

**Є. М. Панов  
С. В. Лелека  
А. Я. Карвацький  
І. О. Мікульонок**

**ЕНЕРГОРЕСУРСООФЕКТИВНЕ  
ПРЕСУВАННЯ  
ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ**

**Монографія**

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2020

УДК 621.777:661.666  
Е62

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»  
(Протокол № 6 від 07.09.2020 р.)*

Рецензенти:

**Б. І. Бондаренко**, д-р техн. наук, акад. НАН України,  
Інститут газу Національної академії наук України  
**А. А. Топоров**, канд. техн. наук, доц.,  
Донецький національний технічний університет

**Е62 Енергоресурсоефективне пресування вуглеграфітових виробів :**  
монографія / Є. М. Панов, С. В. Лелека, А. Я. Карвацький, І. О.  
Мікульонок. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 85 с.: іл. Бібліогр.:  
С. 77–82. 300 прим.

**ISBN 978-617-7734-27-6**

У монографії розглянуто наукові засади теоретично-експериментальних досліджень поведінки вуглепекової маси під час її екструзії крізь мундштук, що проявляє властивості неньютонівської рідини, методів і засобів числового аналізу, методик проведення та даних експериментальних досліджень з фізичних властивостей, а також теплогідродинамічного стану пресового інструменту.

Запропоновано шляхи підвищення ефективності обладнання та технології пресування вуглеграфітових виробів. Розроблено енергоресурсоефективні регламенти пресування заготовок з вуглепекової композиції різного сортаменту, в яких враховується перехід в умовах виробництва на різний матеріальний і гранулометричний склад вихідної сировини.

Для фахівців хімічного машинобудування та споріднених галузей виробництва, а також викладачів, аспірантів і студентів інженерно-хімічних спеціальностей закладів вищої освіти.

**УДК 621.777:661.666**

**ISBN 978-617-7734-27-6**

© Є. М. Панов, С. В. Лелека,  
А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонок, 2020  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського (ІХФ), 2020

## ВСТУП

Вуглецеві матеріали різняться за своїми фізичними властивостями та сферами застосування. В агрегатах чорної та кольорової металургії, а також хімічної промисловості широко використовуються електродні та вуглецеві вироби. До них висувають високі вимоги щодо механічної та термічної міцності, електропровідності й хімічної стійкості. Зазвичай промисловість потребує великогабаритних виробів, які дають змогу підвищувати потужність, продуктивність та енергоефективність обладнання.

Одним з головних способів формування великогабаритної вуглецевої продукції є пресування крізь формуючу матрицю (мундштук), або екструзія. Вуглецева маса (суміш вуглецевмісних наповнювача та зв'язуючого) подається в масний циліндр де ущільнюється плунжером преса, а потім зусиллям близько 60 МН проштовхується крізь мундштук, надаючи заготовці відповідні геометричну форму й розміри. Залежно від типу пресувального обладнання розрізання екструдату на окремі заготовки може здійснювати періодично або безперервно. Одержані заготовки є напівфабрикатом, що потребують подальшого високотемпературного оброблення в спеціалізованих печах електродного виробництва. Проте майбутні властивості кінцевого продукту закладаються ще на етапі його формування. Тому загальною науковою проблемою є вдосконалення процесів та обладнання для формування вуглецевих виробів. Невирішеною частиною наукової проблеми є експериментально-теоретичне дослідження теплогідродинамічного стану промислових пресів під час технологічного процесу екструзії електродних заготовок для розробки заходів з ресурсоенергозбереження у виробництві електродної продукції.

Виконання проведених авторами наукових досліджень базувалося на вдосконаленні температурного та швидкісного регламенту пресування, зменшенні ресурсо- та енерговитратних операцій за допомогою експериментальних та теоретичних методів, зокрема числової моделі фізичного стану обладнання, що дало змогу розробляти регламенти пресування безбракової продукції з поліпшеними фізичними властивостями.

Наукова цінність роботи полягає: в розробці фізичної й математичної моделей теплогідродинамічних полів процесу пресування електродних виробів; отриманні комплексу експериментальних даних з фізичних властивостей вуглецевих мас, а також енерго- й термоаудиті пресового інструменту; числовому аналізі фізичних полів пресового інструменту, раціональних регламентах його експлуатації, що забезпечують вихід бездефектної вуглецевої продукції; створенні програмно-методичного забезпечення для моделювання теплогідродинамічного стану обладнання з метою проведення числового аналізу фізичних полів пресового інструменту з виготовлення вуглецевої продукції, що є необхідним під час проведення науково-технічних розробках в електродній галузі промисловості.

У результаті проведення досліджень отримано:

- фізичну модель поведінки коксопекової суміші під час її пресування крізь мундштук для отримання електродних заготовок;
- обґрунтовано застосування моделі рідини Bingham-Papanastasiou для описання теплогідродинамічного стану пресового інструменту під час екструзії електродних заготовок з коксопекової суміші;
- числову модель теплогідродинамічного стану пресового інструменту під час екструзії електродних заготовок крізь мундштук;
- верифікацію числової моделі теплогідродинамічного стану пресового обладнання за даними експериментальних досліджень. Встановлено, що різниця між розрахунковими та експериментальними значеннями температур мундштука не перевищує 4–10 %, що є цілком прийнятним для проведення інженерних розрахунків для розробки раціональних регламентів експлуатації пресового інструменту за умови зміни складу коксопекової суміші та типорозмірів виробів;
- експериментальні дані з дослідження зсувних напружень на границі коксопекова маса–мундштук у процесі екструзії електродних заготовок та коефіцієнта динамічної в'язкості вуглепекової маси, що є необхідними для числового аналізу фізичних полів пресового інструменту;
- теоретичні дослідження впливу зміни технологічних параметрів на показники режиму пресування, що необхідно для розробки ресурсо-енергозберігаючих регламентів пресування електродних заготовок крізь мундштук;
- розроблено ресурсозберігаючий регламент пресування вуглеграфітових заготовок крізь мундштук.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

$\mathbf{A}$ –	вектор площі поверхні, $\text{м}^2$ ;
$c_p$ –	масова ізобарна теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
$D$ –	діаметр сфери, $\text{м}$ ;
$D_\phi$ –	коефіцієнт дифузії для $\phi$ ;
$\mathbf{F}$ –	вектор об'ємної сили, $\text{Н}/\text{м}^3$ ;
$\mathbf{g}$ –	вектор прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$ ;
$h$ –	явна масова ентальпія, $\text{Дж}/\text{кг}$ ;
$\mathbf{I}$ –	одиничний тензор 2-го рангу, одинична матриця;
$J_f$ –	масовий потік крізь грань $f$ комірки;
$K$ –	коефіцієнт моделі Herschel-Bulkley;
$l$ –	довжина вимірювальної ділянки, $\text{м}$ ;
$m$ –	експоненціальний множник, $\text{с}$ ;
$\mathbf{n}$ –	вектор зовнішньої нормалі до поверхні вхідного або відхідного перерізу;
$n$ –	показниковий коефіцієнт моделі Herschel-Bulkley;
$N_c$ –	кількість комірок, що оточують вузол $n_1$ ;
$p$ –	тиск, $\text{Па}$ ;
$p'$ –	поправка на тиск у розрахунковій комірці, $\text{Па}$ ;
$\mathbf{q}$ –	вектор густини теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;
$q_v$ –	густина об'ємного джерела теплоти, $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;
$\mathbf{r}$ –	вектор зміщення від центра маси комірки до центра грані, $\text{м}$ ;
$r_{n_1 c_i}$ –	відстань від вузла $n_1$ до центра маси поточної комірки, $\text{м}$ ;
$R$ –	універсальна газова стала, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
$S_\phi$ –	об'ємна густина внутрішнього джерела величини $\phi$ ;
$t$ –	час, $\text{с}$ ;
$T$ –	абсолютна температура, $\text{К}$ ;
$\mathbf{u}$ –	вектор швидкості руху середовища, $\text{м}/\text{с}$ ;
$\mathbf{v}$ –	вектор швидкості, $\text{м}/\text{с}$ ;
$\mathbf{V}$ –	вектор швидкості сфери, $\text{м}/\text{с}$ ;
$V$ –	об'єм, $\text{м}^3$ ;
$(x, y, z) \in \Omega$ –	декартові координати, $\text{м}$ ;
$\alpha$ –	коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;
$\alpha_p$ –	коефіцієнт нижньої релаксації для тиску;
$\dot{\gamma}$ –	швидкість деформації, $\text{с}^{-1}$ ;
$\bar{\bar{\gamma}}$ –	тензор швидкості деформації, $\text{с}^{-1}$ ;
$ \dot{\gamma} $ –	другий інваріант від $\bar{\bar{\gamma}}$ , $\text{с}^{-1}$ ;
$\lambda$ –	коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;

$\lambda_{eff}$ –	ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);
$\mu_{eff}$ –	ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;
$\pi$ –	число Пі;
$\rho$ –	густина, кг/м <sup>3</sup> ;
$\tau$ –	вектор напруження зсуву, Па;
$\bar{\tau}$ –	тензор напруження зсуву другого рангу, Па;
$ \tau $ –	другий інваріант від $\bar{\tau}$ , Па;
$\tau_{shear}$ –	критичне зсувне напруження (статичне напруження зсуву), Па;
$\varphi$ –	певна скалярна величина;
$\Omega$ –	розрахункова область.

#### Основні індекси:

0 –	переріз початкового значення;
$\infty$ –	переріз потоку вдалечині від стінки;
$c$ –	переріз розрахункових комірок;
inlet –	переріз вихідного перепізу;
$f$ –	переріз грані розрахункової комірки;
$n$ –	переріз нормалі;
$nb$ –	переріз сусідніх комірок;
$p$ –	переріз центральної комірки;
$s$ –	переріз сфери;
shiar –	переріз зсуву;
wall –	переріз стінки.

#### Інші символи:

$\cdot$ –	скалярний добуток векторів;
$:$ –	оператор подвійного скалярного добутку;
$\nabla$ –	оператор Гамільтона («набла»).

#### Основні скорочення:

CFD –	Computational Fluid Dynamics – обчислювальна гідродинаміка;
GPL –	General Public License – універсальна громадська ліцензія;
SIMPLE–	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations – напівнеявний метод, що зв'язує рівняння за тиском;
OpenFOAM –	Open Field Operation and Manipulation – вільно розповсюджуваний, відкритий програмний код для розв'язання задач обчислювальної гідродинаміки;
PBS –	pressure-based solver – розв'язувач, що базується на тиску;
ВК –	вимірювальний комплекс;
ДГП –	динамічне гаряче пресування;
МГЕ –	метод граничних елементів;

МСЕ –	метод скінченних елементів;
МСО –	метод скінченних об'ємів;
МСР –	метод скінченних різниць;
НДЦ «РТ» –	Науково-дослідний центр «Ресурсозберігаючі технології» КПІ ім. Ігоря Сікорського;
НМГЕ –	непрямий метод граничних елементів;
ПМЗ –	програмно-методичне забезпечення;
КПІ ім. Ігоря Сікорського –	Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ПрАТ «Укрграфіт» –	Приватне акціонерне товариство «Український графіт»;
ПВЕ –	питома витрата енергії;
ПМГЕ –	прямий метод граничних елементів;
СЛАР –	система лінійних алгебричних рівнянь.

# **1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕКСТРУЗІЙНОГО ПРЕСУВАННЯ ЕЛЕКТРОДНИХ ЗАГОТОВОК**

На переділі пресування електродних заготовок закладаються в цілому всі спадкові властивості, що визначають якість готових електродних виробів. У цілому на властивості електродних пресованих заготовок впливають параметри технологічного й конструктивного характеру, які супроводжують процес підготовки й пресування вуглецевих мас [1, 25].

Конструктивні чинники відображають тип і стан робочих органів основного технологічного обладнання – змішувачів, міксерів-охолоджувачів, пресів і пресового інструменту, спосіб прийому й передачі заготовок на охолоджувальний пристрій, устаткування та спосіб різання електродних заготовок, особливості конструкції й засоби для обігріву пресового інструменту.

Нестійкий вплив окремих чинників процесу пресування та особливо відхилення параметрів технологічного регламенту можуть значно погіршувати стабільність фізико-хімічних властивостей і в підсумку якості готових електродних вуглеграфітових виробів [1, 2].

## **1.1. Різновидність способів пресування**

Продукція, яку у великому асортименті виробляють електродні підприємства, вирізняються не тільки фізико-механічними, але й розмірами та формою. Форму, розміри й густину матеріалам надають у процесі пресування. У промисловій практиці найбільшого поширення набули два способи пресування: у прес-форму й видавлюванням крізь мундштук [2]. Проте широко застосовуються й інші методи пресування, які мають деякі відмінності в процесі формування, а саме ізостатичне й динамічне пресування.

Пресування в прес-форму найбільш поширене завдяки забезпеченню отримання деталей, які майже не піддаються механічній обробці після формування [3].

Пресування в прес-форму може бути одностороннім і двостороннім. Одностороннє пресування застосовується під час виготовлення виробів простої конфігурації, у яких відношення довжини або висоти до діаметра або товщини не перевищує три.

Розміри пресованого виробу в напрямку, перпендикулярному напрямку пресування, визначаються розмірами порожнини прес-форми і є для даної прес-форми стабільними. Розмір у напрямку пресування (по висоті) може змінюватися під час кожного чергового пресування.

Отримання виробів заданої висоти можна забезпечити або пресуванням з використанням обмежувачів висоти (так зване пресування до упору), коли хід плунжера преса обмежується спеціальними обмежувачами, або шляхом контролю тиску пресування за індикатором або манометром. Пресування до упору забезпечує високу продуктивність і отримання виробів з розмірами, які



залежать від коливань характеристик маси через вплив останніх на пружну післядію. Метод пресування за тиском ґрунтується на наявності точної відповідності між прикладеним тиском і густиною спресованого виробу для кожного виду електродної маси.

Операція пресування через специфічні особливості накладає обмеження на форму й розміри пресованих виробів. Наприклад, неможливо отримати вироби з бічними западинами, які доводиться виготовляти додатковою механічною обробкою. Отвори, перпендикулярні напрямку пресування, необхідно висвердлювати після операцій пресування й спікання.

Найбільш поширеними видами дефектів пресованих виробів є розшаровані тріщини (розшарування) та осипання граней. Причинами розшарування є неправильний режим пресування (високий тиск пресування за умови використання непластичних наповнювачів з великою пружною післядією), неправильна конструкція прес-форми та її незадовільно оброблені стінки, нерівномірна засипка маси в порожнину матриці та інші чинники [3].

Ізостатичним називають пресування в еластичній оболонці під дією всебічного стискання. У разі, якщо стискальне зусилля створюється рідиною, пресування називають гідростатичним, а якщо газом – газостатичним.

Під час гідростатичного пресування наповнювач засипається в гумову оболонку, яку поміщають у робочу камеру гідростата, створюють потрібний тиск рідиною за допомогою насоса високого тиску.

Як рідину можна використовувати масло, вода, гліцерин. При цьому виді пресування майже відсутнє тертя частинок порошку по стінкам оболонки, оскільки ті з них, що контактують з оболонкою, рухаються разом з нею. Рівність і рівномірність стискаючих зусиль у всіх напрямках призводить до того, що відношення бічного тиску до тиску пресування дорівнює одиниці. Густина різних ділянок одержуваних виробів пресування майже однакова.

Порошок, що перебуває в оболонці, до накладання на нього тиску піддають вібрації для забезпечення рівномірної щільності засипки й дегазації, оскільки повітря, що присутнє в порах засипки, перешкоджає ущільненню виробу.

Гідростатичним пресуванням отримують циліндри, труби, кулі та інші вироби. До недоліків гідростатичного пресування потрібно віднести труднощі отримання виробів з розмірами, близькими до заданих, і необхідність застосування механічної обробки під час виготовлення виробів точних форм і розмірів, а також низьку продуктивність процесу.

Газостатичне пресування поки що не отримало широкого застосування через складність конструкцій пресових пристроїв. Воно може застосовуватися як за кімнатної, так і за підвищеної температури. Пресування за високих температур поєднується з процесом спікання і дає можливість отримувати вироби майже будь-яких матеріалів з густиною, близькою до теоретичної [3].

Мундштучним пресуванням називають формування заготовок продавлюванням суміші наповнювача з пластифікатором крізь отвір у матриці.

Під час мундштучного пресування крізь мундштук можна продавлювати або суміш наповнювача зі зв'язуючим (електродну масу), або попередньо спресовану заготовку, яку перед продавлюванням підігрівають.

Як наповнювач для приготування суміші застосовують непрожарений і прожарений кокс, як в'язуче – кам'яновугільний середньотемпературний пек з температурою розм'якшення по кільцю і шару 82 °С. Маса, які складаються на 70 % прожареного коксу і 30 % пеку та 60 % непрожареного коксу і 40 % пеку, після гарячого змішування охолоджували й диспергували до розміру частинок менше 0,15 мм [4].

Мундштучне пресування ефективно для виробництва електродів різного сортаменту з пекококової суміші [2], а також в інших виробництвах, наприклад, для отримання прутків, труб, куточків та інших довгомірних виробів з матеріалів, що погано пресуються, у тому числі порошків тугоплавких металів і сполук, твердих сплавів тощо [3].

Динамічне формування представляє собою процес пресування з використанням імпульсних навантажень або вібрації. Відмінною рисою такого формування є висока швидкість прикладання навантаження до порошкоподібного матеріалу (через це його часто називають високошвидкісним).

Як джерело енергії використовують енергію вибуху заряду вибухової речовини, ударну хвилю високої інтенсивності, що виникає під час розряду акумульованої електричної енергії та впливає на матеріал через рідину, енергію стисненого газу, вібрацію.

Під час вибухового формування енергія вибуху передає певну швидкість пристрою, діє на прес-пуансон, або передається на пресований порошок через рідину, або впливає на пресований порошок, укладений в еластичну оболонку чи тонкостінний металевий контейнер. Такий високошвидкісний вид пресування сприяє виділенню теплоти й нагріванню контактних міжчастинкових ділянок, що істотно полегшує процес деформування. У результаті густина заготовок досягає більшого значення, ніж за звичайних методів пресування низькошвидкісними навантаженнями.

Різновидом динамічного формування є динамічне гаряче пресування (метод ДГП). Метод заснований на попередньому холодному формуванні пористої заготовки з порошкової шихти заданого складу, її подальшому короткочасному нагріванні і допресуванні динамічними навантаженнями. Цей метод дає змогу отримувати майже безпористі вироби точних розмірів з високою чистотою поверхні.

Під час вібраційного формування використовується ефект сприятливого впливу вібрації на процес ущільнення, що пов'язано з руйнуванням міжчастинкових зв'язків і поліпшенням взаєморухливості частинок. У результаті досягається щільне укладання частинок за меншого тиску пресування й забезпечується висока рівномірність розподілу густини по всьому об'єму заготовки.

Енергія вібрації витрачається на подолання інерції й пружного опору віброуючої системи, а також на подолання інерції, сил тертя та зчеплення

ущільнюваного порошку. Під час ущільнення порошку невеликої маси основну роль мають інерція й пружні властивості системи. Тому для забезпечення найбільш раціонального режиму ущільнення треба вибирати частоту вібрації ближче до власної частоти коливань системи. У разі ущільнення великих мас порошку основну роль відіграватимуть власна частота коливань шару частинок і сили зв'язку між ними. Тому частоту вібрації вибирають ближче до резонансної або по відношенню до віброуючої системи, або по відношенню до ущільнюючої маси порошку. За умови правильного вибору частоти, прискорення та амплітуди вібрації щільність і міцність виробів вища, ніж за умови статичного пресування.

У всіх випадках, що потребують високого тиску під час статичного пресування, доцільним буде застосування вібрації [3].

## 1.2. Основні технологічні процеси, що проходять під час екструзії електродної маси

Найбільшого поширення в промисловості набув спосіб гідростатичного пресування, який здійснюється видавлюванням маси крізь мундштук у виробництві вугільних і графітованих електродів, а також багатьох інших видів конструкційних виробів у різних галузях промисловості (рис. 1.1). Цей спосіб дає змогу отримати заготовки з поперечним розміром від 30 мм до 1200 мм і забезпечує найбільшу продуктивність процесу за достатньо рівномірних фізико-механічних властивостях готових виробів [1, 25].

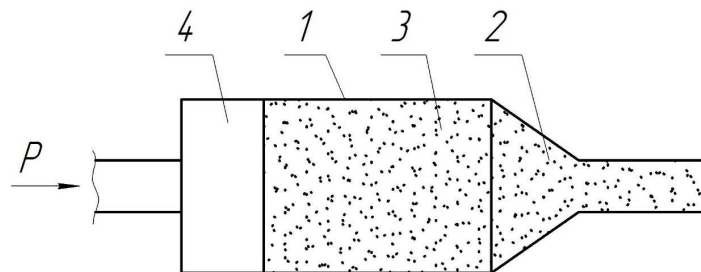


Рис. 1.1. Схема пресування видавлюванням крізь мундштук:

1 – контейнер, 2 – мундштук, 3 – вуглепекова маса, 4 – пуансон;  $P$  – сила тиску

Під час пресування видавлюванням ущільнена маса безперервно виходить крізь мундштук у вигляді готового виробу. Пресувати електродну масу можна тільки в гарячому стані. Якість маси й температурний режим визначають величину тиску, за якого може відбуватися процес.

Процес пресування складається з двох самостійних операцій: підпресування, а також безпосередньо пресування.

Підпресуванням називають операцію ущільнення завантаженої в контейнер маси за умови закритого вихідного отвору мундштука. У конструкції преса мають бути передбачені пристрої для виконання цієї операції. Конструктивно це оформляється по-різному: або між контейнером і мундштуком встановлюється плита для підпресування, або у вихідній частині мундштука – запірний пристрій.

Під час запресовування досягається дуже високий ступінь ущільнення маси в контейнері. Це формує характер витоку маси крізь мундштук, що дає змогу забезпечити пресування більш високого ступеня однорідності й щільності. Підпресування виключається лише в тих випадках, якщо в контейнер маса завантажується попередньо утрамбована або ж вона затрамбовується безпосередньо в контейнері.

Вибір тиску підпресування за різного ступеня ізометрії зерен наповнювача та його крупності може вплинути на якість готових виробів.

Пресування полягає у витисканні електродної маси з контейнера крізь мундштук. Маса під дією поршня преса просувається вздовж контейнера паралельно шарам перерізу контейнера. На границі з мундштуком відбуваються значні зміни характеру пересування шарів маси: внутрішні шари починають випереджати периферійні, оскільки шлях руху в них коротший за периферійні. Такий характер пересування маси призводить до її розшарування, що знижує якість ущільнення та структури пресування. Позбутися цього негативного результату неможливо, необхідно лише прямувати до зменшення ступеня розшарування, або не допускати його подальший розвиток. Стрімко змінюють характер витоку маси, викликаючи ускладнення процесу пресування й погіршення якості пресування, такі параметри як порушення теплового режиму пресування, нерівномірна температура маси в об'ємі контейнера, занадто великі шматки завантаженої маси, різна пластичність маси в одному завантаженні контейнера.

Нові порції завантаження пресмаси виконуються у залишок попередньої порції маси, що перебуває в мундштуку. У цьому разі ділянка стикування мас на виході з мундштука має бути вилучена, тому що під час випалювання на ній утворюються тріщини через неоднакову усадку кожного шару маси.

У процесі пресування утворюються специфічні структури вуглеграфітових матеріалів, які визначають анізотропію властивостей кінцевого продукту.

Під час пресування маси ізометричні частинки найбільших розмірів укладаються перпендикулярно до напрямку деформуючих зусиль. Ступінь орієнтування в анізотричних частинок залежить від їхньої форми й довжини шляху, який вони проходять за час пресування.

Найбільш довгий шлях частинки проходять у разі пресування виробів на прошивних пресах (спосіб видавлювання), і в цих умовах досягається найбільш досконале орієнтування анізотричних частинок [2].

До переваг застосування методу видавлювання крізь мундштук у технологічному обладнанні можна віднести такі характеристики заготовок та процесу [1]:

- чистота поверхні заготовок;
- однорідний розподіл густини за об'ємом;
- висока продуктивність;
- можливість отримання складних конфігурацій і великих розмірів заготовок;
- відсутність втрат матеріалу;
- видавлювання можна проводити в будь-якому напрямку.

### **1.3. Способи вдосконалення процесу пресування вуглеграфітових заготовок**

Важливе значення має режим попереднього підпресування маси в контейнері, що впливає на якість «зелених» заготовок. У праці Є. Ф. Чалих [2] тиск підпресування рекомендовано витримувати на рівні не менш 75 % від зусилля пресу. Вибір тиску підпресування за різного ступеня анізотропії зерен наповнювача та його крупності може мати вирішальний вплив на якість готових виробів.

Дані з дослідження однорідності графітованих електродів з використання ізоотопу сірки свідчать про підвищений до 26–36 % вміст зв'язуючого в тонкому поверхневому шарі заготовок (до 2 мм). Нерівномірний розподіл зв'язуючого призводить до різної густини матеріалу по перерізу заготовок.

Якість виробів суттєво змінюється від нестачі або надлишку зв'язуючого. Нестача зв'язуючого призводить до низької міцності та високої поруватості, а його надлишок – до викривлення, вигину заготовок, погіршенню механічної міцності [1].

Для одержання електродних заготовок високої якості необхідний правильний вибір температурно-швидкісних й силових умов деформації.

Технологічний режим пресування передусім визначається: асортиментом виробів і режимом їх обтискання; формою поперечного перерізу пресованих заготовок, раціональним співвідношенням температури контейнера, мундштука й пресованої маси.

Застосування зв'язуючого з підвищеною температурою розм'якшення призводить не тільки до зростання тиску пресування, але й до підвищення рівня температурного режиму всього пресового інструменту. Тиск пресування визначається гранулометричним складом маси й кількістю зв'язуючого, а також суттєво залежить від температури маси, що завантажується в прес, яка передусім визначається розмірами пресованих виробів і режимом обтискання: чим більший розмір виробу й нижче ступінь деформації, тим нижче має бути температура пресованої маси. Це обумовлюється необхідністю збереження геометричних розмірів гарячих заготовок.

Температурний режим пресування круглих електродних заготовок регулюється тільки по зонах пресування. Для блочної продукції додатково потрібно створювати певне температурне поле по периметру калібру, що досягається встановленням спеціальних електричних нагрівників. При цьому прагнуть до створення різниці температури між кутами й серединою сторін блоку до 10–30 К.

Виявлена така закономірність. У режимах пресування температура завантажуваної маси для дрібних (50×250 мм), середніх (200×350 мм) і великих (450×710 мм) заготовок складає відповідно 100–110, 90–100 і 70–90 °С. Температура контейнера преса 100–110 °С, розтруба мундштука 110–130 °С, калібру мундштука 140–160 °С.

Застосування мундшуків полегшеної конструкції (внаслідок меншої теплової інерції) потребує більш інтенсивної тепловіддачі та більш високої температури самого мундштука. Найбільш низький рівень обігріву калібру

(120–130 °C) встановлюється на мундштуках з короткою калібрувальною зоною.

Відхилення температури завантажуваної маси від допустимої призводить до погіршення якості заготовок. Так, за температури 110 °C і вище маса погано спресовується по всьому об'ємі заготовки, при цьому спостерігається підвищений брак за поперечними тріщинами. За температури маси, близької до температури розм'якшення пеку, незважаючи на задовільну поверхню заготовки, внутрішня її частина не достатньо пресується. Це особливо проявляється, коли масу готують для пресування не в камері, а в барабанному охолоджувачі. Усунути цей дефект можна корекцією температури маси під час її завантаження у прес.

Відповідно до діючих на електродних заводах технологічних процесів контрольованими параметрами є температурний режим й тиск пресування. Практика пресування показала, що контролю тиску пресування недостатньо. Так, браковану масу з надлишком зв'язуючого можна спресувати як годну, застосовуючи переохолодження. У зв'язку з цим необхідним є додатковий контроль за швидкістю пресування. Якість пресованих заготовок можна оцінити за інтенсивністю видавлювання, яка характеризується величиною зусилля для видавлювання одиничного об'єму маси за 1 с. З боку технології інтенсивність видавлювання найбільш повно характеризує процес отримання електродних заготовок, оскільки враховує спільний вплив температурно-швидкісних і силових умов деформації.

Величина інтенсивності видавлювання для кожного виду заготовок має перебувати в заданому діапазоні, вихід з його границь призводить до браку, спричинених недопустимими деформацією або тріщинами.

Середня швидкість пресування зазвичай становить  $(3-6) \times 10^{-2}$  м/с за тиску пресування 6–12 МПа.

Контрольованим параметром також є тиск і час підпресування маси в контейнері: чим більше тиск підпресування, тим у більшому ступені відбувається переорієнтація анізотричних зерен наповнювача в об'ємі контейнера пресу. При цьому розподіл зв'язуючого по перерізу виробів стає нерівномірним. Наступне видавлювання попередньо зпресованої маси крізь мундштук супроводжується переорієнтацією зерен уздовж осі пресування. За малого ступеня деформації цей процес розповсюджується не на повну глибину перерізу заготовки, що призводить до неоднорідності фізико-хімічних властивостей виробів [5].

#### **1.4. Застосування математичного моделювання фізичних полів під час екструзії вуглецевих композитів крізь мундштук**

Виготовлення великогабаритної вуглецевої продукції, зокрема, електродів або елементів конструкції печей чорної та кольорової металургії, потребує багатоетапного ланцюга виробництва, специфічного обладнання й значних ресурсів та енергетичних витрат. Для одержання високоякісного кінцевого продукту вихідна сировина (кокс, антрацит, пек різних видів і марок)

піддають подрібненню, змішуванню, формуванню та багатостадійному високотемпературному обробленню. Така технологія дає змогу отримати монолітні вуглецеві вироби з анізотропією властивостей у широкому діапазоні габаритних розмірів: площа поперечного перерізу від  $7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  до  $0,38 \text{ м}^2$ ; довжина від 1 м до 3,58 м [25].

Під час формування вуглеграфітовій продукції надається необхідна геометрична форма й розміри, а також закладаються її майбутні фізичні властивості. Найбільш широко на електродних заводах розповсюджений метод пресування видавлюванням або екструзією вуглецевої маси крізь формуючу матрицю (мундштук), що пояснюється високою продуктивністю й низькою вартістю такого процесу. Суміш вуглевмісного наповнювача й зв'язуючого (пресмаса) подається в масний циліндр гідравлічного преса, де попередньо ущільнюється. Під дією зусилля близько 60 МН маса видавлюється крізь мундштук, таким чином виробу надається потрібна форма. Після цього, сформована в заготовку маса обрізується до потрібного розміру та охолоджується для перешкоджання подальшій її деформації [26].

У разі формування електродних заготовок методом екструзії визначальну роль у забезпеченні бездефектної та високоякісної продукції відіграє технологічний регламент процесу. До чинників, що визначають регламент пресування, належать склад пресмаси та геометричні характеристики майбутнього виробу. До керуючих параметрів цього процесу потрібно віднести: ізо статичну температуру, що витримується в масному циліндрі; тиск і швидкість пресування; температурний режим нагрівників мундштука, які забезпечують необхідну температуру на його поверхнях під час роботи і зупинок на кожному з етапів кампанії пресування.

У промисловій практиці визначення раціональних регламентів процесу формування вуглевмісних заготовок пов'язано зі значними витратами часових, матеріальних та енергетичних ресурсів, що спричинено проведенням дослідних кампаній під час переходу на новий склад пресмаси або новий вид продукції. Тому розробка та застосування методів математичного моделювання в умовах реального виробництва є безумовно актуальним і дає змогу майже повністю виключити дослідні кампанії пресування за умови ефективного ресурсоенергозбереження.

### **1.5. Числові методи розв'язання задач, що описують поведінку коксопекової суміші в процесі пресування заготовок**

До широко застосовуваних числових методів на практиці розв'язання задач теплогідродинаміки відносяться такі методи: метод скінченних різниць (МСР), скінченних елементів (МСЕ), скінченних об'ємів (МСО), граничних елементів (МГЕ) та ін.

Метод скінченних різниць [6–10] базується на апроксимації скінченними різницями вихідного диференціального рівняння в частинних похідних на певному сітковому шаблоні, який є результатом дискретизації або заміни безперервної області сукупністю дискретних точок (вузлів). У результаті цього здійснюється перехід від безперервної до дискретної функції і розв'язок

вихідного рівняння в частинних похідних зводиться до розв'язку системи алгебричних рівнянь. Для отримання скінченно-різницевого аналогу рівняння в частинних похідних можуть бути використані різні методи: розкладання функцій в ряд Тейлора; інтерполяція функцій поліномами; інтегро-інтерполяційний метод; метод контрольного об'єму. Перші три методи належать до формальних методів побудови різницевих схем, оскільки при цьому використовуються тільки відповідний математичний апарат без врахування фізичних законів збереження. У разі застосування ряду Тейлора одночасно чітко визначається порядок апроксимації отриманої дискретної похідної.

При використанні методу контрольного об'єму різницева схема будується на базі фізичних законів збереження, наслідком яких є певне рівняння в частинних похідних. Якщо рівняння в частинних похідних записано в дивергентній формі, то закон збереження можна отримати, інтегруючи це рівняння за контрольним об'ємом, застосовуючи формулу Гауса-Остроградського [11]. На практиці цей метод завжди дає консервативні різницеві схеми [8, 9]. Наразі метод контрольного об'єму виділився в окремий метод [12] і дістав назву методу скінченних об'ємів (переважно в зарубіжній літературі) і був розвинутий для неструктурованих сіток тіл довільної форми.

МСР застосовується майже для всіх задач математичної фізики з областями правильної геометрії, за винятком, наприклад, задач радіаційного теплообміну. Для областей зі складною геометрією треба виконувати перетворення вихідних рівнянь за допомогою узагальнених криволінійних координат [6], що значно ускладнює алгоритм розв'язання задачі.

Метод скінченних елементів [13–15]. З точки зору обчислювальної математики основна ідея МСЕ полягає в тому, що мінімізація функціоналу варіаційної задачі здійснюється на сукупності функцій, кожна з яких визначена на своїй підобласті. Тобто МСЕ базується на одному з варіаційних методів – методі Рітца (для задач теорії пружності) і належить до одного з напрямків діакоптики – загального методу дослідження складних систем шляхом їх розчленування. При цьому довільна розрахункова область розбивається на скінченні елементи (наприклад, на довільні чотиригранники або шестигранники), усередині кожного з яких задаються деякі функції форми, які дають змогу визначити шукану функцію всередині елемента за її значенням у вузлах, тобто в місцях стиковки скінченних елементів. За координатні функції приймаються функції, тотожно рівні нулю всюди, крім одного скінченного елемента, всередині якого вони є функціями форми. За невідомі коефіцієнти методу Рітца беруться вузлові переміщення. Мінімізація функціоналу енергії приводить до алгебричної системи рівнянь, тобто аналогічно варіаційно-різницеvim методам.

Область застосування МСЕ значно розширилась після врахування можливості отримання рівнянь, що визначають скінченні елементи, за допомогою варіантів методу зваженого нев'язки, такого як метод Гальоркіна або найменших квадратів [11]. Це дало змогу теоретичного обґрунтування МСЕ для розв'язання багатьох типів диференціальних рівнянь. Таким чином, МСЕ



перетворився на загальний метод числового розв'язання диференціальних рівнянь у частинних похідних та їх систем. Значним недоліком МСЕ, як і інших варіаційних методів, є складність отримання апіорних оцінок.

Метод скінченних об'ємів [12, 16]. Найбільш ефективним числовим методом розв'язання CFD-задач (computational fluid dynamics) є МСО, який має безсумнівну перевагу по відношенню до інших числових методів, яка полягає в дотриманні фундаментального закону збереження енергії в кожній розрахунковій комірці поза залежністю від параметрів дискретизації розрахункової області, тобто не залежить від розмірів та кількості розрахункових комірок. МСО дає змогу будувати консервативні дискретні аналоги висхідних диференціальних рівнянь на етапі свого формулювання, тому що відправною його точкою є інтегральне формулювання законів збереження маси, імпульсу, енергії та інших (формула Гауса й теорема Гауса–Остроградського, як зазначалося вище). Інтегральні співвідношення МСО записуються для довільного контрольного об'єму, а їх дискретний аналог визначається підсумовуванням по всіх гранях скінченного об'єму потоків імпульсу, маси тощо, з використанням відповідних квадратурних формул. Оскільки інтегральне формулювання законів збереження не накладає обмежень на форму контрольного об'єму, МСО придатний для дискретизації рівнянь гідрогазодинаміки як на структурованих, так і на неструктурованих сітках з різноманітною формою комірок, що також не накладає обмежень на ступінь складності геометрії розрахункової області. Також МСО можна достатньо успішно застосовувати як для задач гідродинаміки, так і для задач теплопровідності твердих тіл й цілої низки інших задач, тобто розв'язувати спряжені задачі.

Метод граничних елементів базується на теорії інтегральних рівнянь [17]. Сутність методу полягає в перетворенні диференціального рівняння в частинних похідних, яке описує поведінку невідомої функції усередині і на границі області, на інтегральне рівняння, яке визначає тільки граничні значення, і потім знаходження числового розв'язку цього рівняння. При цьому розмірність задачі зменшується на одиницю.

Наразі чітко встановлено, що метод граничних елементів є важливим, альтернативним по відношенню до існуючих числових підходів з дослідження механіки суцільного середовища [18, 19]. Існує два основних формулювання МГЕ: пряме й непряме. У прямому формулюванні (ПМГЕ) невідомі функції що входять в інтегральне рівняння, збігаються з функціями вихідного диференціального рівняння в частинних похідних і тому мають певний фізичний зміст. У непрямому формулюванні (НМГЕ) інтегральні рівняння повністю виражаються через фундаментальний сингулярний розв'язок [17] вихідних диференціальних рівнянь, який розподілений з невідомою густиною на границі області. Функції густини не мають певного фізичного змісту, але коли вони визначені, то значення фізичних функцій вихідної задачі може бути визначено простим інтегруванням. Еквівалентність прямого та непрямого формулювання було вперше доведено В. Д. Купрадзе [20].

## **1.6. Програмне забезпечення для розв'язання задач екструзії електродних заготовок крізь мундштук**

Для проведення числового аналізу фізичного стану промислового та лабораторного обладнання існує безліч спеціалізованих програмних продуктів. Деякі з них є вузькоспеціалізованими, тобто спрямованими на розв'язання певного класу задач, а деякі являють собою комплекси різних інструментів для розв'язання широкого кола задач в одному робочому середовищі. Серед найбільш відомих програмних продуктів варто відмітити такі: ANSYS, ANSYS FLUENT, ANSYS CFX, STAR-CD, FLOWVISION, COMSOL Multiphysics, ELMER, OpenCFD. Більшість з них є комерційними продуктами із закритим кодом, які поширюються під власними ліцензіями, що тягне за собою низку переваг й недоліків. Але при цьому існують деякі проекти, які працюють на умовах вільного програмного забезпечення з відкритим програмним кодом. Прикладом такого проекту є OpenFOAM [21], який орієнтований на розв'язання задач мультифізики.

OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) – вільно розповсюджуваний, відкритий програмний код, що є широким набором інструментів для розв'язання задач обчислювальної гідродинаміки. Поширюється згідно ліцензії GNU General Public License (GPL) (Універсальна громадська ліцензія GNU), яка гарантує, що в користувача є свобода використовувати, копіювати, поширювати, вивчати, змінювати та удосконалювати програмне забезпечення. За допомогою цього програмного продукту можна розв'язувати задачі гідродинаміки для ньютонівських і неньютонівських рідин із врахуванням стисливості середовища; багатофазні задачі з урахуванням хімічних реакцій і тепло- та масообміну; задачі горіння рідин, газів і твердих частинок; розрахунки на міцність і динаміки твердих тіл; електричні задачі, задачі магнетизму й фінансового моделювання. Також є багато додаткових інструментів для роботи з геометрією, створення розрахункової сітки, підготовки до обчислень і обробки отриманих результатів. До його складу входять понад 80 різних розв'язувачів і 170 утиліт [21]. При цьому всі задачі можуть розв'язуватися із застосуванням паралельних обчислень. OpenFOAM має відкритий програмний код, написаний на мові C++ і дає змогу користувачу вносити власні зміни та доповнення. При цьому код реалізований так, що більшість диференціальних та тензорних операторів можуть бути представлені в зрозумілій формі. Користуючись OpenFOAM, дослідник самостійно вибирає розв'язувач залежно від математичної постановки задачі. Побудову геометрії фізичної моделі та її дискретизацію можна виконувати за допомогою утиліти blockMesh, що входить до складу OpenFOAM. Для побудови більш складних геометричних моделей може бути також застосована відкрита інтегрована платформа SALOME [22] або Gmsh [23]. Візуалізацію результатів числового моделювання можна виконувати з використанням вільного програмного забезпечення ParaView [24].

Використання вільного відкритого програмного забезпечення є безумовно актуальним і фінансово доцільним для сучасної наукової роботи, тому для розв'язання раніш сформульованих завдань були обрані саме ці програмні коди.

## 1.7. Висновки до розділу 1

Аналіз особливостей і показників пресування електродних вуглеграфітових заготовок і математичного моделювання цього процесу, виконаний на підставі вивчення літературних джерел, показує таке:

1) На переділі пресування електродних «зелених» заготовок закладаються всі спадкові властивості, що визначають якість готових виробів. На властивості пресованих заготовок впливають чинники технологічного й конструктивного характеру, що супроводжують процес підготовки й пресування електродної маси (композиту, який складається із вуглецевого наповнювача і зв'язуючого – пеку).

2) До технологічних чинників належать енергосилові умови змішування і пресування маси, температурно-швидкісного режиму змішування, підготовки і пресування маси, а також пластичні властивості маси.

3) Конструктивні чинники відображають тип і стан робочих органів основного технологічного обладнання – змішувачів, міксерів-охолоджувачів, пресів і пресового інструменту, спосіб прийому й передачі заготовок на охолоджувальне устаткування, обладнання і спосіб відрізання електродних заготовок, особливості конструкції і спосіб обігріву пресового інструменту.

4) З існуючих способів пресування електродних заготовок за такими показниками як продуктивність, швидка зміна сортаменту продукції та собівартість виробництва на одне з перших місць можна поставити спосіб екструзії вуглепекової композиції крізь мундштук. Цей спосіб набув найбільшого поширення в електродній промисловості.

5) Разом з перевагами цей спосіб екструзії вуглепекової композиції крізь мундштук має суттєву залежність від параметрів технологічного регламенту (тиску пресування, температурного режиму тощо). У разі недотримання вимог технологічного регламенту та значного розшарування електродної маси виникає висока ймовірність отримання бракованих заготовок пов'язаних з порушенням їх цілісності за рахунок утворення тріщин.

6) Процес пресування крізь мундштук складається з двох самостійних операцій: підпресування та власне пресування. Підпресуванням називають операцію ущільнення маси, що завантажена в контейнер, під час закритого вихідного отвору мундштука. Власне пресування полягає у видавлюванні маси з контейнера крізь мундштук. Маса під дією поршня преса спокійно переміщається вздовж контейнера паралельними шарами по перерізу контейнера.

7) У процесі пресування утворюються специфічні структури вуглеграфітових матеріалів, які визначають анізотропію властивостей кінцевого продукту. Це обумовлюється передусім особливою геометричною формою твердих наповнювачів.

8) На границі з мундштуком відбувається значна зміна характеру переміщення шарів маси: внутрішні шари починають випереджувати периферійні, оскільки шляхи руху в них коротші, чим у периферійних. Такий характер переміщення маси призводить до її розшарування, що знижує якість ущільнення й структури заготовок. Це негативне явище характерно для способу

пресування крізь мундштук, але позбавитися нього неможливо, необхідно тільки прямувати до зменшення розшарування, або не допускати його подальшого розвитку. Стрімко змінюють характер витоку маси, спричинюючи ускладнення пресування і погіршення якості заготовок, такі чинники як порушення теплового режиму пресування, нерівномірна температура маси в об'ємі контейнера, занадто крупні куски завантаженої маси, різна пластичність маси в одному завантаженні контейнера.

9) Під час пресування крізь мундштук на границі поверхня мундштука–тіло формованої заготовки утворюється тонкий шар розплавленого пеку, який виконує функцію змащення, тобто зменшує зсувні напруження під час пресування. Тонкий шар пеку утворюється за рахунок його витіснення з об'єму заготовки на її периферію внаслідок сегрегації частинок наповнювача під дією тиску.

10) Для мінімізації матеріальних і часових ресурсів для вирішення проблеми екструзії електродних заготовок крізь мундштук (тріщиноутворення тощо) доцільно застосовувати математичне моделювання. Для моделювання процесів екструзії існують два основних підходи: перший – на базі теорії механіки твердого деформованого тіла, другий – у рамках обчислювальної гідродинаміки з використанням моделей стану неньютонівських рідин.

11) Для коректного застосування методів математичного моделювання екструзії необхідно мати достовірні дані з фізичних властивостей вуглепекової композиції та початкових й граничних умов процесу, що досліджується.

Для досягнення поставленої мети досліджень були сформульовані такі завдання:

- проаналізувати стан питання експериментального дослідження й математичного моделювання процесу та обладнання для екструзії електродних вуглеграфітових заготовок;
- розробити фізичну й математичну моделі теплогідродинамічного стану процесу екструзії коксопекової композиції – вуглеграфітової маси під час формування електродних заготовок;
- провести експериментальні дослідження фізичних властивостей електродної вуглепекової маси;
- провести експериментальні дослідження з розподілу полів температури та швидкості в пресовому інструменті та видавлюваній масі на діючому екструзійному устаткованні;
- розробити числову модель теплогідродинамічного стану пресового інструменту та провести її верифікацію;
- теоретично дослідити вплив зміни технологічних параметрів (температура, тиск) на показники режиму пресування (рівномірність полів швидкості й температури в масі, що пресується);
- провести комплекс числових експериментів для визначення раціональних технологічних параметрів екструзійного обладнання для пресування електродних вуглеграфітових заготовок;
- розробити рекомендації щодо впровадження у виробництво енергоефективних процесів та обладнання для одержання бездефектних електродних заготовок.

## **2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОГІДРОДИНАМІЧНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕКСТРУЗІЇ ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ЕЛЕКТРОДНИХ ЗАГОТОВОК**

Електродна або коксопекова маса представляє собою композитний матеріал, який проявляє властивості неньютонівської рідини. Тому загальнонауковою проблемою є вибір адекватної моделі динамічної в'язкості для моделювання течії маси під час її пресування.

Невирішеною частиною наукової проблеми є створення адекватної математичної та відповідної числової моделей екструзії (див. розділ 1) на підставі глибоких фізичних уявлень про досліджуваний процес, які б давала можливість в умовах виробництва відпрацьовувати регламенти пресування заготовок у разі зміни складу коксопекової суміші та типорозмірів виробів.

Тому однією з головних цілей проведеного дослідження було створення математичної моделі процесу екструзії вуглецевих заготовок для розробки раціональних регламентів пресового інструменту, що забезпечують умови виходу бездефектної продукції.

### **2.1. Фізична та математична моделі теплогідродинамічного стану пресового устаткування**

Для формулювання адекватної теплогідродинамічної математичної моделі процесу екструзії електродної маси крізь мундштук насамперед треба сформулювати детальні фізичні уявлення про цей процес, тобто сформулювати фізичну модель, що передуює формулюванню математичної моделі.

Промислове формування вуглецевих заготовок методом екструзії крізь мундштук преса включає такі технологічні етапи:

- заповнення масного циліндра преса охолодженою масою;
- підпресування маси;
- пресування та маркування виробів;
- відрізання заготовок певної довжини;
- охолодження водою та огляд заготовки на приймальному столі пресу;
- транспортування заготовки на рольганг для охолодження;
- транспортування заготовки на стелаж для проведення виробничого контролю.

Приготована в змішувальних машинах маса, температура якої складає 125–135 °С, транспортується конвеєрами в барабан-охолоджувач, де охолоджується до 90 °С. Далі маса подається в форкамеру преса, звідки плунжером просувається в масний циліндр. У масному циліндрі маса піддається підпресуванню – операції, за якої відбуваються ущільнення й видалення повітря та пари з пеку.

Після заповнення масного циліндра відбувається безпосередньо пресування, яке полягає у видавлюванні маси крізь отвір мундштука для надання виробу певної геометричної форми, розмірів і густини. Під час цього

технологічного етапу температура в масному циліндрі та внутрішній поверхні мундштука підтримується в певному діапазоні, що забезпечує необхідну пластичність маси та умови вільного проковзування. Температурний режим витримується за рахунок декількох основних та додаткових нагрівників, які розташовано всередині пресового інструменту.

Отримання заготовок заданої довжини здійснюється відрізанням сформованої маси відрізними ножами. Далі заготовки охолоджуються на рольгангу водою впродовж 4 год методом зрошення або у ванні [26].

Фізичні властивості маси визначають характер її течії та умови теплової взаємодії в робочому просторі пресового інструменту.

Коксопековий композит проявляє дуалізм властивостей залежно від значень внутрішнього напруження. З одного боку, нижче певного рівня зовнішньої механічної дії електродна маса зберігає свою цілісність, проявляючи пластичні властивості, що схожі з твердим тілом, а з іншого боку – за умови достатнього зовнішнього зусилля маса починає текти як в'язка рідина. Такі властивості дають підставу віднести електродну масу до в'язко-пластичних матеріалів [27, 28].

Для опису поведінки зазначеного класу речовин застосовуються моделі Bingham (2.1), Herschel–Bulkley (2.2), Casson (2.3) [29–31]. Для простої двовимірної зсувної течії (течії Couette) ці моделі записуються таким чином (рис. 2.1):

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{\text{shear}} + \mu_{\text{eff}} \dot{\boldsymbol{\gamma}}, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{\text{shear}} + K \dot{\boldsymbol{\gamma}}^n, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} \sqrt{\boldsymbol{\tau}} = \sqrt{\tau_{\text{shear}}} + \sqrt{\mu_{\text{eff}}} \dot{\boldsymbol{\gamma}}, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (2.3)$$

де  $\boldsymbol{\tau}$  – вектор напруження зсуву, Па;  $\tau_{\text{shear}}$  – критичне зсувне напруження (статичне напруження зсуву), Па;  $\mu_{\text{eff}}$  – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;  $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$  – швидкість деформації, с<sup>-1</sup>;  $K$ ,  $n$  – коефіцієнти моделі Herschel-Bulkley.

За даними праць [27, 28] коксопекова маса за своїми властивостями близька до найбільш простої зі згаданих моделей – моделі Bingham. Для тривимірного випадку тензорна форма рівняння (2.1) матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} \overline{\overline{\boldsymbol{\tau}}} = \left( \mu_{\text{eff}} + \frac{\tau_{\text{shear}}}{|\dot{\boldsymbol{\gamma}}|} \right) \overline{\overline{\dot{\boldsymbol{\gamma}}}}, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \overline{\overline{\dot{\boldsymbol{\gamma}}}} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (2.4)$$

де  $\bar{\bar{\tau}}$  – тензор напруження зсуву, Па;  $|\dot{\gamma}| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\dot{\gamma}}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\bar{\bar{\dot{\gamma}}} : \bar{\bar{\dot{\gamma}}})}$  – другий інваріант від  $\bar{\bar{\dot{\gamma}}}$ ,  $c^{-1}$ ;  $\bar{\bar{\dot{\gamma}}} = \nabla \mathbf{v} + \mathbf{v} \nabla$  – швидкість деформації,  $c^{-1}$ ;  $\mathbf{v}$  – вектор швидкості, м/с;  $\nabla$  – оператор Гамільтона,  $m^{-1}$ ;  $|\tau| = \sqrt{\frac{1}{2} II_{\tau}} = \sqrt{\frac{1}{2} (\bar{\bar{\tau}} : \bar{\bar{\tau}})}$  – другий інваріант від  $\bar{\bar{\tau}}$ , Па.

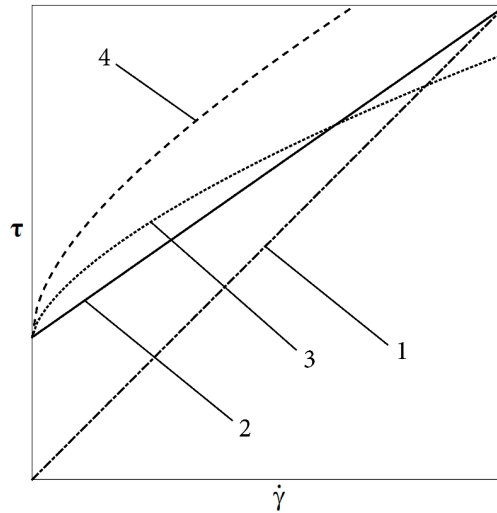


Рис. 2.1. Залежність зсувного напруження від швидкості деформації для різних моделей в'язко-пластичної рідини: 1 – ньютонівська рідина; 2 – рідина Bingham; 3 – рідина Herschel-Bulkley; 4 – рідина Casson

Модель Bingham (2.4) передбачає співіснування двох областей (рідкої й твердої), що передбачає значні обчислювальні труднощі під час моделювання в області сильної нелінійності фізичних величин. Для вирішення цієї проблеми Papanastasiou [32] запропонував регуляризацию рівняння напружено-деформованого стану потоку в'язко-пластичного матеріалу за допомогою введення експоненціального множника в рівняння (2.4)

$$\bar{\bar{\tau}} = \left( \mu_{eff} + \frac{\tau_{shear}}{|\dot{\gamma}|} [1 - \exp(-m|\dot{\gamma}|)] \right) \bar{\bar{\dot{\gamma}}}, \quad (2.5)$$

де  $m$  – експоненціальний множник, с.

Рівняння (2.5) (модель Bingham-Papanastasiou) є справедливим для всіх значень  $|\tau|$  і дає близькі результати до ідеальної рідини Bingham за значень  $m \geq 100$  (рис. 2.2).

Грунтуючись на вищезазначеному фізичну модель процесу пресування електродних заготовок крізь мундштук можна сформулювати таким чином. Процес екструзії вуглепекової композиції крізь мундштук для отримання вуглеграфітових заготовок є циклічним і його можна поділити на два основних етапи: перший – це розігрів пресового інструменту після завантаження в масний циліндр вуглепекової композиції до певного рівня температур, що

визначається температурою розм'якшення зв'язуючого; а другий – це підпресування і безпосередньо процес екструзії вуглепекової маси крізь мундштук для одержання вуглеграфітових заготовок. При цьому процес відрізання заготовок певної довжини не розглядається. На першому етапі рух маси не відбувається, а здійснюється лише її підпресування, тобто відбувається тільки її деформація. Тому цей етап можна вважати статичним по відношенню до механічної дії, а з боку зміни теплового стану він є нестационарним, оскільки відбувається процес нагрівання інструменту разом з вуглепековою масою. Другий етап є динамічним, оскільки відбувається екструзія (рух) маси крізь мундштук та її в'язко-пластична деформація разом зі зміною розподілу температур в її об'ємі. Вуглепекова композиція вважається неньютонівською нестисливою рідиною, а саме рідиною типу Bingham–Papanastasiou. Екструзія маси відбувається завдяки переміщенню поршня в масному циліндрі пресового інструменту. Нагрівання пресового обладнання разом з масою здійснюється за рахунок електричних нагрівників, що розташовані в масному циліндрі та мундштуку. Регулювання інтенсивністю нагріву (рівнем температур) відбувається зміною електричних параметрів нагрівників за даними датчиків температури, що встановлені в тілі пресового інструменту. Охолодження заготовки після екструзії здійснюється зрошенням її водою. Зазначені етапи екструзії заготовок відбуваються згідно з регламентом пресування, в якому задаються як температурні параметри та характер їх зміни, так і динамічні – швидкість пресування та зміна електричних параметрів нагрівників.

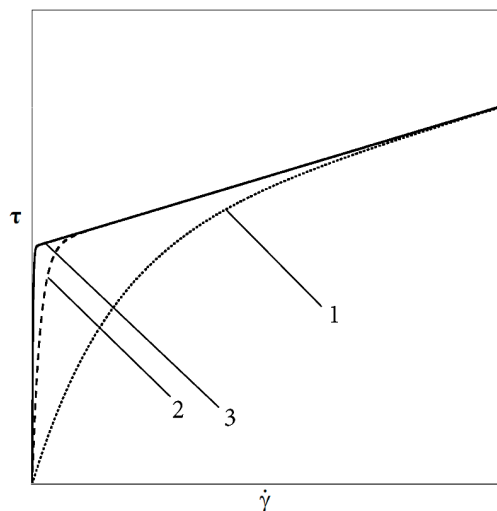


Рис. 2.2. Залежність зсувних напружень від швидкості деформації для моделі рідини Bingham-Papanastasiou за різних значень параметра  $m$ : 1 –  $m = 1$ ; 2 –  $m = 10$ ; 3 –  $m = 100$

Отже, відповідно до сформульованої фізичної моделі, математична модель процесу екструзії коксопекового композита може бути представлена системою рівнянь, яка включає рівняння нерозривності та нестационарні, нелінійні рівняння збереження кількості руху та енергії [33] для ламінарного потоку нестисливої рідини Bingham–Papanastasiou для пресмаси (2.6) та рівняння енергії (2.7) з внутрішнім джерелом теплоти для твердих елементів пресового інструменту:



$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{v} = 0; \\ \rho \left[ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}}; \\ \rho \left[ \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} h) \right] = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + \bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}} : \nabla \mathbf{v}, \end{array} \right. \quad (2.6)$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T) \nabla T] + q_v, \quad (2.7)$$

де  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – час, с;  $p$  – тиск, Па;  $h = \int_0^T c_p(T) dT$  – явна масова ентальпія, Дж/кг;  $T$  – абсолютна температура, К;  $c_p$  – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);  $\lambda_{eff}$  – ефективний коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  $\bar{\bar{\boldsymbol{\tau}}} : \nabla \mathbf{v}$  – член, що відповідає дисипації механічної енергії, Вт/м<sup>3</sup>;  $(:)$  – оператор подвійного скалярного добутку;  $q_v$  – об’ємна густина джерела теплоти, Вт/м<sup>3</sup>.

За початкові умови системи рівнянь (2.6), (2.7) приймаються розподіл полів компонент вектора швидкості, тиску та температури:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{v}_0 = \mathbf{v}(x, y, z); \\ p_0 = p(x, y, z); \\ T_0 = T(x, y, z), \end{array} \right. \quad (2.8)$$

де  $(x, y, z) \in \Omega$  – декартові координати, м;  $\Omega$  – розрахункова область.

Для врахування різних етапів процесу пресування застосовуються динамічні граничні умови (2.9)–(2.12). Такі граничні умови відображають зміни в  $\Omega$  під час підпресовування матеріалу, пресування окремих заготовок і простоїв для виконання технологічних операцій, а також зміни режиму роботи нагрівальних елементів пресового інструменту.

Для коксопекової маси, що рухається у внутрішньому просторі мундштука, задаються такі граничні умови: у вхідному перерізі – нормальна швидкість і температура (2.9); у відхідному перерізі – нульовий градієнт тиску й температури (2.10); на поверхнях контакту маса–елементи пресового інструменту – умови проковзування та умови абсолютного теплового контакту (2.11):

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{inlet}(t); \\ T = T_{inlet}(t), \end{array} \right. \quad (2.9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{n} \cdot \nabla p = 0; \\ \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0, \end{array} \right. \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} \bar{\tau} = \tau_{\text{wall}}; \\ \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0, \end{cases} \quad (2.11)$$

де  $\mathbf{n}$  – вектор зовнішньої нормалі до поверхні вхідного або відхідного перерізу;  $v_{\text{inlet}}, T_{\text{inlet}}$  – швидкість (м/с) та абсолютна температура (К) у вхідному перерізі, відповідно;  $\tau_{\text{wall}}$  – тензор зсувних напружень на границі контакту маса-тверде тіло, Па;  $\{T\} = T^+ - T^-$ ;  $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{q}^+ + \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{q}^-$ .

Для елементів пресового інструменту також задаються такі граничні умови: умови теплообміну з оточуючим середовищем, умови абсолютного теплового контакту та внутрішнє джерело теплоти

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot (-\lambda(T) \nabla T) = \alpha(T - T_{\infty}); \\ \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0; \\ q_v = q_v(t), \end{cases} \quad (2.12)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);  $T_{\infty}$  – абсолютна температура оточуючого середовища, К,  $q_v(t)$  – внутрішнє джерело теплоти, що змінюється у часі та спричинюється нагрівальними елементами, Вт/м³.

Математична постановка (2.5)–(2.12) є повним математичним формулюванням задачі для визначення теплогідродинамічного стану пресового інструменту під час екструзії вуглепеккових заготовок.

## 2.2. Методика числового розв'язання задачі на базі методу скінченних об'ємів

Для числового розв'язання сформульованої задачі (2.5)–(2.12), що включає рівняння збереження маси, руху та енергії, використовується метод скінченних (контрольних) об'ємів або МСО [12, 34].

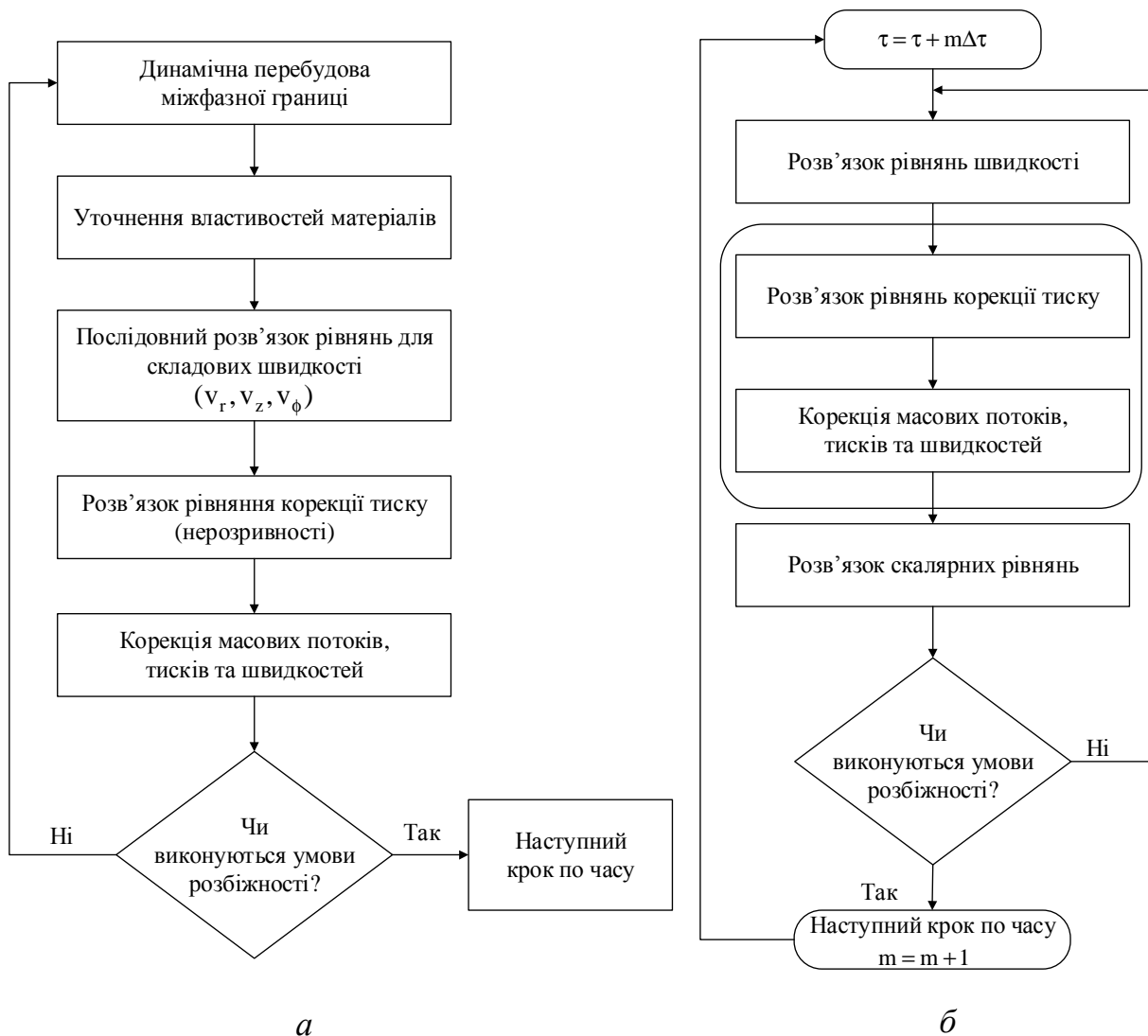
У загальному випадку процедура застосування методу скінченних об'ємів складається з таких етапів:

- розбиття розрахункової області на дискретні контрольні об'єми або побудова розрахункової сітки моделі;
- складання системи дискретних рівнянь відносно дискретизованих залежних (невідомих) змінних, таких як компоненти швидкості, тиск, температура шляхом інтегрування рівнянь математичної моделі по кожному контрольному об'єму;
- лінеаризація дискретних алгебричних рівнянь і розв'язання отриманої системи лінійних алгебричних рівнянь (СЛАР) для визначення уточнених значень залежних змінних.

Для числового розв'язання рівнянь Нав'є–Стокса нестисливої рідини використовується алгоритм, який базується на визначенні поля тиску (pressure-based solver, PBS (рис. 2.3)) [35]. У цьому алгоритмі поля компонент швидкості визначаються за допомогою розв'язання рівняння тиску (або рівняння корекції тиску) для заданого обмеження у вигляді умови нерозривності (рівняння збереження маси). Оскільки визначальні рівняння є нелінійними та зв'язаними, процес числового розв'язання є ітераційним та повторюється до виконання умови збіжності числових розв'язків.

Алгоритм PBS реалізує розв'язання визначальних рівнянь послідовно, тобто окремо одне від одного. Рівняння для залежних змінних ( $\mathbf{v}, p, T$ ) розв'язуються одне за іншим, і кожне визначальне рівняння в процесі розв'язання відокремлюється від інших. Такий підхід зменшує потреби до обчислювальних ресурсів. Недоліком такого способу є невелика швидкість збіжності числового розв'язку.

Кожна ітерація включає такі кроки (див. рис. 2.3,а) [12]:



Рис

2.3. Послідовність ітераційного процесу алгоритму PBS для розв'язання стаціонарного (а) та нестаціонарного (б) процесів

1) Уточнення фізичних властивостей матеріалів, для яких задана залежність від температури на основі температурного поля поточного розв'язку. Такими властивостями можуть бути, наприклад, густина, масова теплоємність, теплопровідність, в'язкість тощо;

2) Розв'язання рівнянь руху, послідовно одне за одним, з використанням останніх уточнених значень тиску та масових потоків на границях розрахункових комірок;

3) Розв'язання рівняння корекції тиску за отриманими полями швидкості та масових потоків;

4) Корекція масових потоків на границях, тиску та полів швидкості за допомогою поправки до значень тиску, які отримано на попередньому ітераційному кроці;

5) Розв'язання скалярного рівняння енергії з використанням поточних значень змінних;

6) Уточнення значень внутрішніх джерел за їх наявності;

7) Перевірка поточного результату розв'язку за заданими критеріями збіжності (наприклад, максимальної величини нев'язок для визначальних рівнянь, записаних у дивергентній формі). Виконання описаних кроків продовжується в ітераційному циклі, доки не буде досягнуто заданих критеріїв збіжності.

### 2.2.1. Дискретизація та розв'язання скалярних рівнянь

Розглянемо числову методику для приведення вихідних диференціальних рівнянь математичної моделі (2.6) до дискретного вигляду та подальшого розв'язання СЛАР, яка побудована на МСО [35].

Дискретизацію визначальних рівнянь найпростіше показати на прикладі нестационарного рівняння збереження, записаного для деякої скалярної величини  $\phi$ . Розглянемо скалярне нестационарне рівняння, яке записане в інтегральній формі для довільного контрольного об'єму  $V$

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} = \oint D_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV, \quad (2.13)$$

де  $\rho$  – густина;  $\mathbf{v}$  – вектор швидкості;  $\mathbf{A}$  – вектор площі поверхні контрольного об'єму  $V$ ;  $D_\phi$  – коефіцієнт дифузії для  $\phi$ ;  $\nabla \phi$  – градієнт величини  $\phi$ ;  $S_\phi$  – об'ємна густина внутрішнього джерела величини  $\phi$ .

Рівняння (2.13) застосовується до кожного контрольного об'єму (комірки) в межах розрахункової області. Трикутна комірка (рис. 2.4,а) може бути прикладом такого контрольного об'єму. Дискретизація рівняння (2.13) для даної комірки дає

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f \rho_f \phi_f \mathbf{v}_f \cdot \mathbf{A}_f = \sum_f D_f \nabla \phi_f \cdot \mathbf{A}_f + S_\phi V, \quad (2.14)$$

де  $N_f$  – кількість граней, що оточують комірку;  $\Phi_f$  – потік  $\Phi$ , що передається крізь грань  $f$ ;  $\rho_f \Phi_f \mathbf{v}_f \cdot \mathbf{A}_f$  – масовий потік крізь грань;  $\mathbf{A}_f$  – вектор площі грані  $f$ ;  $\nabla \Phi_f$  – градієнт величини  $\Phi$  на грані  $f$ ;  $V$  – об'єм комірки.

Визначення  $\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} V$  здійснюється відповідно до обраної схеми дискретизації за часом, що розглядається в нижче наведених рівняннях.

Усі рівняння математичної моделі можуть бути представлені в загальному вигляді (2.13) для подальшого розв'язання задач на багатовимірних неструктурованих сітках, складених з довільних багатогранників. Дискретне скалярне рівняння (2.14) містить невідому скалярну величину  $\Phi$  у центрі комірки, а також невідомі її значення в оточуючих сусідніх комірках. У загальному випадку це рівняння буде нелінійним відносно цих змінних. Лінеаризована форма рівняння (2.14) може бути записана як

$$a_p \Phi = \sum_{nb} a_{nb} \Phi_{nb} + b, \quad (2.15)$$

де індекс  $nb$  вказує на сусідні комірки,  $a_p$  та  $a_{nb}$  є лінеаризованими коефіцієнтами для  $\Phi$  та  $\Phi_{nb}$ .

Кількість сусідів для кожної комірки залежить від топології розрахункової сітки, але зазвичай дорівнює кількості граней, що оточують комірку (за винятком приграничних комірок).

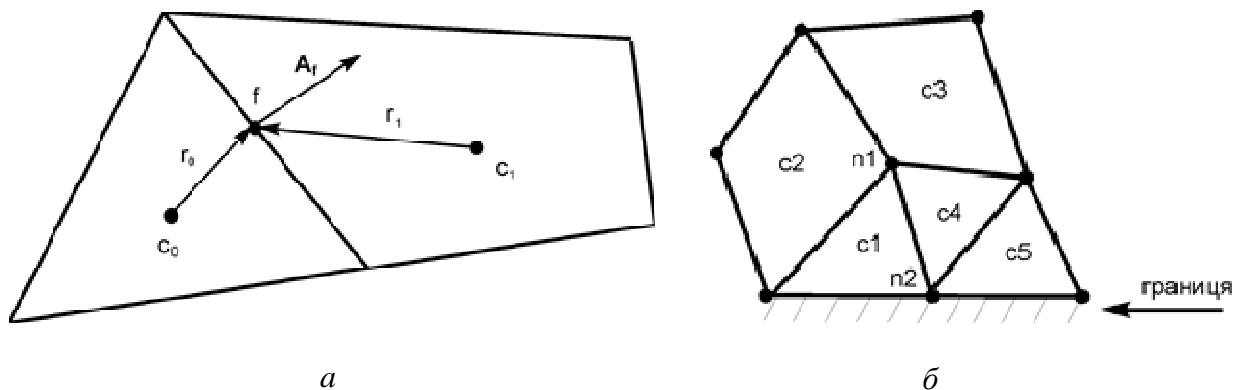


Рис. 2.4. Дискретизація рівнянь переносу: а – приклад контрольного об'єму; б – визначення значень величини у вузлових точках

Подібні рівняння записуються для всіх комірок сітки, в результаті чого отримується СЛАР з коефіцієнтами, що формують розріджену матрицю. Ця система лінійних рівнянь зазвичай розв'язується з використанням точково-неявного методу (методу Гаусса–Зейделя) [36].

Дискретні значення величини  $\Phi$  відповідають координатам центрів комірок ( $c_0$  і  $c_1$  на рис. 2.4,а). Однак для визначення конвективних складових у рівнянні (2.14) необхідно знайти відповідні значення на границях  $\Phi_f$ . Для їх визначення виконується інтерполяція на основі відомих значень величини в

центрах комірок, для чого застосовується так звана схема «проти потоку» [12]. Принцип дії схеми полягає в тому, що значення на гранях  $\phi_f$  визначаються через значення в комірках у напрямку проти потоку, відносно напрямку нормальної складової швидкості  $v_n$  у рівнянні (2.15).

Схеми з першим порядком апроксимації зазвичай не забезпечують високої точності розрахунків. При цьому значення на гранях комірки визначаються за припущення, що значення в центрі комірки репрезентують середнє значення величини у всій комірці, і значення на гранях дорівнюють значенню в комірці. Таким чином, для схеми першого порядку апроксимації, значення на грані  $\phi_f$  встановлюється рівним значенню комірки з боку набігаючого потоку.

Для підвищення точності розрахунків застосовується схема з другим порядком апроксимації. При цьому значення величин на гранях комірок визначаються з використанням підходу багатовимірною лінійного перетворення, сутність якого полягає в досягненні більш високого ступеня точності через розкладення розв'язку для центру комірки в ряд Тейлора навколо центра цієї комірки [37]. Значення на грані  $\phi_f$  визначається як  $\phi_f = \phi + \nabla\phi \cdot \mathbf{r}$ , де  $\phi$  та  $\nabla\phi$  – значення величини в центрі комірки та її градієнт з боку набігаючого потоку,  $\mathbf{r}$  – вектор зміщення від центра цієї комірки до центра грані. Така схема потребує визначення градієнта  $\nabla\phi$ .

Під час виконання розрахунків спочатку доцільно використовувати схему з першим порядком апроксимації, який у більшості випадків забезпечує більш швидко збіжність числового розв'язку. У разі потреби в уточненні отриманого результату розв'язок продовжується, але вже з другим порядком апроксимації змінних величин.

Оцінка градієнтів потрібна не лише для визначення значень величин на гранях комірок, а й для обчислення дифузних складових та похідних за швидкістю. Градієнт  $\nabla\phi$  використовується для дискретизації конвективних і дифузних складових у рівняннях руху. Для розрахунків градієнтів застосовується теорема Гріна-Гауса [11], за якою градієнт скалярної величини  $\phi$  у центрі комірки  $c_0$  у дискретній формі розраховується за формулою

$$\nabla\phi|_{c_0} = \frac{1}{V} \sum_f \bar{\phi}_f A_f, \quad (2.16)$$

де  $\bar{\phi}_f$  – значення величини  $\phi$  у центрі грані комірки, а сума береться по всіх гранях, що оточують комірку. Значення  $\bar{\phi}_f$  може оцінюватись одним з двох способів:

1) Як середнє арифметичне значень у центрах сусідніх комірок

$$\bar{\phi}_f = \frac{\phi_{c_0} + \phi_{c_1}}{2}; \quad (2.17)$$

2) Як середнє арифметичне значень у вузлах грані

$$\bar{\varphi}_f = \frac{1}{N_{fn}} \sum_n^{N_{fn}} \bar{\varphi}_n, \quad (2.18)$$

де  $N_{fn}$  – кількість вузлів на грані  $f$  комірки ( $N_{fn}=2$  для двовимірних задач). Вузлові значення  $\bar{\varphi}_n$  визначаються як зважені середні від комірок, що оточують вузол, відповідно до способу, який запропонували Холмс [38] та Роуч [39]. Наприклад, значення величини  $\varphi$  у вузлі  $n_1$  (рис. 2.4,б) визначається виразом

$$\bar{\varphi}_{n_1} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \frac{\varphi_{c_i}}{r_{n_1 c_i}}}{\sum_{i=1}^{N_c} \frac{1}{r_{n_1 c_i}}}, \quad (2.19)$$

де  $N_c$  – кількість комірок, що оточують вузол  $n_1$ ,  $r_{n_1 c_i}$  – відстань від вузла  $n_1$  до центра поточної комірки. Така схема є більш точною за попередню для неструктурованих сіток, передусім для трикутних або тетраедричних комірок.

Під час розрахунків нестационарних процесів дискретизацію визначальних рівнянь переносу необхідно виконувати як у просторі, так і в часі. Дискретизація за часом включає інтегрування кожної складової рівняння переносу в інтервалі часу  $\Delta t$ .

Загальний вираз, що описує зміну у часі величини  $\varphi$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = F(\varphi), \quad (2.20)$$

де функція  $F$  включає в себе будь-яку просторову дискретизацію.

Для визначення  $F(\varphi)$  на наступному часовому кроці використовується неявне інтегрування за часом, тобто  $\varphi^{m+1}$  для даної комірки визначається через  $\varphi^{m+1}$  сусідніх комірок (тут  $m$  є номером кроку за часом). Неявне інтегрування за часом також може виконуватись з першим або другим порядком апроксимації, відповідно до співвідношень:

$$\frac{\varphi^{m+1} - \varphi^m}{\Delta t} = F(\varphi^{m+1}); \quad \frac{3\varphi^{m+1} - 4\varphi^m + \varphi^{m-1}}{2\Delta t} = F(\varphi^{m+1}), \quad (2.21)$$

де індекси  $m+1$ ,  $m$ ,  $m-1$  відповідають значенням на наступному часовому кроці ( $t + \Delta t$ ), поточному кроці ( $t$ ) та попередньому кроці ( $t - \Delta t$ ), відповідно.

Ці неявні рівняння розв'язуються в ітеративному циклі на кожному часовому кроці перед переходом на наступний часовий крок. Перевагою

повністю неявної схеми є її безумовна збіжність, незалежно від величини кроку інтегрування за часом.

Загальна похибка дискретизації за часом визначається як вибором схеми апроксимації (першого чи другого порядку), так і способом переходу на наступний часовий рівень (схеми розрахунку за часом). Часова дискретизація призводить до похибки округлення. Послідовний алгоритм розв'язання рівнянь привносить також похибку розщеплення системи рівнянь. У межах кожного часового кроку всі рівняння розв'язуються послідовно в ітеративному циклі, до виконання умов збіжності. Перехід на черговий часовий рівень потребує виконання ряду зовнішніх ітерацій, як це наведено на рис. 2.3,б. У разі використання такої ітеративної схеми, нелінійність окремих рівнянь та спряження їх між собою повністю враховуються, усуваючи таким чином похибку розщеплення вихідних рівнянь.

### 2.2.2. Особливості дискретизації рівнянь руху і нерозривності

Розглянемо детальніше процедуру дискретизації рівнянь руху та нерозривності та роботу алгоритму PBS у цілому. Для простоти напишемо стаціонарні рівняння нерозривності та руху в інтегральній формі:

$$\oint \rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} = 0; \quad (2.22)$$

$$\oint \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} = -\oint \rho \mathbf{I} \cdot d\mathbf{A} + \oint \bar{\bar{\tau}} \cdot d\mathbf{A} + \int_V \mathbf{F} dV \quad (2.23)$$

де  $\mathbf{I}$  – одинична матриця,  $\bar{\bar{\tau}}$  – тензор напруження другого рангу,  $\mathbf{F}$  – вектор об'ємної сили.

Схема дискретизації, описана в рівняннях (2.14)–(2.21) для рівняння переносу скалярної величини  $\phi$ , використовується в тому числі для дискретизації рівнянь руху. Наприклад, для  $x$ -складової рівняння руху, якщо прийняти  $\phi = v_x$ , отримаємо

$$a_p v_x = \sum_{nb} a_{nb} v_{x,nb} + \sum p_f \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} + S. \quad (2.24)$$

Якби поля тиску й масових потоків на гранях були відомими, рівняння (2.24) може бути розв'язане за методикою, розглянутою в попередньому підрозділі, в результаті буде отримано поле швидкості. Проте поле тиску та масові потоки крізь грані не є заздалегідь відомими, тому їх необхідно розрахувати як частину розв'язку. Значення як тиску, так і швидкості визначаються для центра комірки. Однак рівняння (2.24) включає значення тиску на грані між комірками  $c_0$  і  $c_1$  (рис. 2.4,а). Тому потрібно застосувати деяку схему інтерполяції для розрахунків значень тиску на гранях через відомі значення тиску в комірках.

Для числових розрахунків у роботі використовувалася схема зміщених у шаховому порядку сіток [12], сутність якої полягає у використанні дискретного



балансу маси (нерозривності) для розміщених у шаховому порядку контрольних об'ємів навколо грані для розрахунку тиску на цій грані. Ця схема є універсальною, для всіх типів сіток забезпечує приблизно однакову точність, при цьому добре підходить для задач з наявністю обертання, розвинутою гравітаційною конвекцією та примусовою течією в криволінійних областях.

Рівняння нерозривності (2.22) може бути проінтегровано в контрольному об'ємі (див. рис. 2.4), при цьому отримаємо дискретне рівняння

$$\sum_f^{N_f} J_f A_f = 0, \quad (2.25)$$

де  $J_f = \rho v_n$  – масовий потік крізь грань  $f$  комірки.

Для його визначення необхідно знайти значення швидкості на грані  $v_n$  через відомі значення швидкості в центрах комірок. Проста лінійна інтерполяція значень швидкості в центрах комірок призводить до нефізичного розподілу тиску в комірках, тому замість цього використовується процедура, аналогічна розглянутій у праці [37]. Значення швидкості на грані осереднюється не лінійно, а з використанням зваженого за моментами усереднення з використанням вагових коефіцієнтів, отриманих з коефіцієнтів  $a_p$  рівняння (2.24). Тоді масовий потік  $J_f$  можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} J_f &= \rho_f \frac{a_{p,c_0} v_{n,c_0} + a_{p,c_1} v_{n,c_1}}{a_{p,c_0} + a_{p,c_1}} + d_f \left\{ [p_{c_0} + (\nabla p)_{c_0} \cdot \mathbf{r}_0] - [p_{c_1} + (\nabla p)_{c_1} \cdot \mathbf{r}_1] \right\} = \\ &= \hat{J}_f + d_f (p_{c_0} - p_{c_1}), \end{aligned} \quad (2.26)$$

де  $p_{c_0}, p_{c_1}, v_{n,c_0}, v_{n,c_1}$  – відповідно тиск та нормальні складові швидкості для комірок по обидва боки від грані, а  $\hat{J}_f$  враховує вплив швидкості в цих комірках (рис. 2.4,а). Складова  $d_f$  є функцією від  $\bar{a}_p$  – середнього від коефіцієнтів  $a_p$  рівняння швидкості для комірок з кожного боку від спільної грані  $f$ .

Спряження рівнянь руху й тиску досягається використанням рівняння (2.26) для отримання додаткової умови за тиском для перетворенні рівняння (2.25). Як зазначалось вище, в алгоритмі розрахунку течії розв'язуються визначальні рівняння послідовно одне за одним, при цьому спряження тиску й швидкості виконується шляхом їх корекції для виконання умови збереження маси і отримання поля тиску. Базовий алгоритм спряження має назву SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) [40].

Якщо розв'язати рівняння руху за деякого наближеного поля тиску  $p^*$ , то результуючий масовий потік крізь грань  $J_f^*$ , розрахований з рівняння (2.26)

$$J_f^* = \hat{J}_f^* + d_f (p_{c_0}^* - p_{c_1}^*), \quad (2.27)$$

не задовольнятиме рівнянню нерозривності. Тому до потоку крізь грань  $J_j^*$  додається поправочна складова  $J'_j$  таким чином, щоб відкоригований потік  $J_j$  задовольняв умові нерозривності, тобто

$$J_f = J_f^* + J'_f \quad (2.28)$$

при цьому поправка  $J'_f$  розраховується як

$$J'_f = d_f (p'_{c_0} - p'_{c_1}), \quad (2.29)$$

де  $p'$  – поправка на тиск у комірці.

Якщо підставити рівняння корекції потоку (2.28) і (2.29) у дискретне рівняння нерозривності (2.25), отримаємо дискретне рівняння поправки тиску  $p'$  у комірці

$$a_p p' = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b, \quad (2.30)$$

де складова  $b = \sum_f^{N_f} J_f^* A_f$  – результуючий потік до комірки.

Після розв'язання рівняння корекції тиску (2.30) виконується власне корекція тиску в комірці та потоку крізь грань відповідно до співвідношень

$$p = p^* + \alpha_p p'; \quad J_f = J_f^* + d_f (p'_{c_0} - p'_{c_1}), \quad (2.31)$$

де  $\alpha_p$  – коефіцієнт нижньої релаксації для тиску. Відкоригований потік крізь грань  $J_f$  повністю задовольняє дискретне рівняння нерозривності на кожній ітерації.

Для прискорення збіжності числового розв'язання у випадках, коли спряження тиску та швидкості є основним стримуючим чинником для отримання розв'язку, доцільно застосування модифікованого алгоритму SIMPLE, названого як SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) [41]. Процедура виконання цього алгоритму аналогічна базовому SIMPLE, за винятком розрахунку поправки для потоку крізь грань  $J'_f$ . У цьому алгоритмі використовується процедура, яка називається «корекцією асиметрії» та значно збільшує швидкість збіжності на сильно деформованих сітках.

Внаслідок нелінійності визначальних рівнянь, необхідно контролювати зміну величини  $\phi$ , що зазвичай досягається за допомогою нижньої релаксації змінних (явна релаксація). Релаксація змінних виконується для деяких властивостей матеріалів (наприклад, для яких задано залежність від температури) та шуканих змінних (наприклад, тиск). Релаксація полягає в зменшенні зміни  $\phi$  на кожній ітерації. Наприклад, нове значення величини  $\phi$  для комірки залежить від попереднього значення  $\phi_{old}$ , розрахованого значення

зміни цієї величини  $\Delta\varphi$  та відповідного коефіцієнта нижньої релаксації  $\alpha$  таким чином:  $\varphi = \varphi_{old} + \alpha\Delta\varphi$ .

Нижня релаксація рівнянь (також відома як неявна релаксація) використовується в PBS для стабілізації характеру збіжності в зовнішніх нелінійних ітераціях, аналогічно до координатно-залежного кроку за часом. Рівняння (2.15) з врахуванням неявної релаксації записується у вигляді

$$a_p\varphi = \alpha\left(\sum_{nb} a_{nb}\varphi_{nb} + b\right) + (1-\alpha)a_p\varphi_{old}. \quad (2.32)$$

### 2.3. Висновки до розділу 2

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

- 1) Розроблено фізичну модель поведінки коксопекової суміші під час її пресування крізь мундштук для отримання електродних заготовок.
- 2) Виконано обґрунтування застосування моделі рідини Bingham-Papanastasiou для описання теплогідродинамічного стану пресового інструменту під час екструзії електродних заготовок з коксопекової суміші.
- 3) Розглянуто особливості реалізації числової методики розв'язання задачі теплогідродинамічного стану пресового інструменту на базі методу скінченних об'ємів з використанням pressure-based solver та алгоритму SIMPLE.

### **3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВУГЛЕПЕКОВИХ КОМПОЗИТІВ І ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ ПРЕСОВОГО ІНСТРУМЕНТУ**

#### **3.1. Експериментальна установка, методика та результати дослідження динамічної в'язкості коксопекових композитів**

Склад та будова вуглецевого композиту обумовлює його в'язко-пластичні властивості, що залежать від температури. Важливим завданням є визначення зв'язку між властивостями компонентів та ефективними властивостями їх суміші під час нагрівання та формування в заготовки електродної маси. Експериментальне визначення ефективної динамічної в'язкості вуглецевої маси в широкому діапазоні температур, що відповідає технологічним умовам виробництва вуглевмісної продукції, наразі відноситься до невирішених науково-технічних задач.

Метою досліджень у частині визначення фізичних властивостей вуглепекових композитів є створення експериментальної установки та визначення ефективної динамічної в'язкості різних за складом вуглецевих мас у широкому діапазоні температур.

Під час формування вуглецевої маси, матеріал проявляє неньютонівські властивості, що можуть бути описані моделлю в'язко-пластичної рідини Bingham (див. розділ 2) [28, 42]. Для в'язко-пластичної рідини характерною особливістю є те, що вона до досягнення певного критичного внутрішнього напруження поводить себе як тверде тіло і тільки за умови перевищення значення внутрішнього напруження деякої критичної величини починає рухатися як звичайна рідина. Причиною такого явища є те, що в'язко-пластична рідина має просторову жорстку внутрішню структуру, що чинить опір будь-яким внутрішнім напруженням меншим за критичну величину  $\tau_{\text{shear}}$ . Для двовимірного випадку зсувного руху модель в'язкості Bingham має вигляд (2.1).

Робочий діапазон температури, що використовується на етапах змішування та формування вуглевмісної маси, становить 120–170 °С. Відомо, що зазначений матеріал має високе значення коефіцієнта ефективної динамічної в'язкості, який знижуються з підвищенням температури [28]. Тому особливий інтерес представляють дослідження саме в цьому діапазоні.

Серед основних способів визначення динамічної в'язкості композитних матеріалів треба відмітити методи з використанням циліндричного ротаційного віскозиметра та клас методів із зануренням у матеріал певного геометричного об'єкту.

У працях [27, 43, 44] досліджено температурні залежності зсувних напружень від швидкості деформації для коксопекової суміші в діапазоні 160–220 °С. Автори досліджують суміш, що складається з 55 % пеку та 45 % коксу різної фракції, на коаксіальному циліндричному віскозиметрі. У результаті встановлено, що для вказаного складу вуглецевої маси та діапазону температури критичне напруження зсуву та ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості складають відповідно:  $\tau_{\text{shear}} = 2...4$  Па;  $\mu_{\text{eff}} = 2...18$  Па·с. Отримані

дані свідчать, що високий вміст зв'язуючого за температури вищої за 160 °С, призводить до значного зниження динамічної в'язкості матеріалу.

У працях [45, 46] наведено методику визначення реологічних властивостей вуглецевих композицій, що ґрунтується на екструзії матеріалу на лабораторному пресі. Дослідження проведені за температури 120 °С для сумішей, які містять 50, 45, 40, 38 % зв'язуючого. Отримані результати показують, що досліджуваний матеріал має  $\tau_{\text{shear}} = (2,1 \dots 7,5) \cdot 10^5$  Па;  $\mu_{\text{eff}} = (2,1 \dots 20) \cdot 10^5$  Па·с. При цьому найвищі значення в'язкості та напруження зсуву характерні для низького вмісту наповнювача.

У праці [26] для дослідження критичного напруження зсуву застосовується метод занурення конуса. Розглянуто електродну масу з вмістом зв'язуючого від 39,6 % до 30 % за умови ізостатичної температури 110 °С. Показано, що зсувні напруження становлять  $\tau_{\text{shear}} = (4,5 \dots 32) \cdot 10^5$  Па.

Автори [47] досліджували ефективну динамічну в'язкість за допомогою ротаційного лопатевого віскозиметра для електродної маси (19 % зв'язуючого) у діапазоні температури 100–260 °С. Визначено, що  $\mu_{\text{eff}} = (0,22 \dots 2,14) \cdot 10^4$  Па·с.

Представлені літературні дані певною мірою корелюють між собою, проте не є вичерпними, тому інтерес представляє розроблення методики та проведення експериментальних досліджень для вуглецевих композитів, які використовуються для виготовлення подових блоків та електродів Содерберга.

Враховуючи значну динамічну в'язкість вуглецевої маси в робочому діапазоні температури змішування та формування виробів, застосування методу занурення геометричного об'єкту є раціональним способом для визначення фізичних властивостей даних матеріалів.

Відомо, що під час руху тіла у в'язкому середовищі виникають сили опору. За невеликої швидкості, коли за тілом не формуються турбулентні вихори, сила опору зумовлена лише в'язкістю середовища. У цьому разі прилеглі до тіла шари рідини рухаються разом з об'єктом, що призводить до утворення сил, які гальмують відносний рух тіла та середовища. Для тіл сферичної форми сила опору визначається за законом Стокса

$$\mathbf{F} = 3\mu_{\text{eff}} D \mathbf{u}, \quad (3.1)$$

де  $D$  – діаметр сфери, м;  $\mathbf{u}$  – вектор швидкості руху середовища, м/с.

На рухому сферу діють три сили: сила тяжіння, сила Архімеда та сила опору. Перші дві є незмінними, а сила опору прямо пропорційна швидкості, тому на початковому етапі занурення сфери в середовище, вона менша за силу тяжіння, що призводить до рівноприскореного руху кулі. Проте, через певний час настає момент рівноваги всіх трьох сил, тоді сфера рухається зі сталою швидкістю, яка визначається співвідношенням

$$\mathbf{V} = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\mu_{\text{eff}}} g D^2, \quad (3.2)$$

де  $\rho_s$  – густина сфери, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_f$  – густина середовища, кг/м<sup>3</sup>;  $\mathbf{g}$  – вектор прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Для випадку усталеного занурення сфери у в'язке середовище  $u_z = V_z = h/\tau$ , де  $h$  – відстань (м), що проходить сфера за час  $\tau$  (с),  $u_z$  – вертикальна компонента вектора швидкості середовища, м/с;  $V_z$  – вертикальна компонента вектора швидкості сфери, м/с. Тоді

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_f)}{h} g_z D^2 \tau, \quad (3.3)$$

де  $g_z$  – вертикальна компонента вектора прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Отже коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості розрахується за виразом (3.3), якщо для відомих значень густини середовища та матеріалу сфери за результатами експериментальних вимірів визначити час  $\tau$ , за який сфера діаметром  $D$  проходить відстань  $h$  за умови сталої швидкості кулі.

З використанням описаної методики визначення динамічної в'язкості вуглецевої маси розроблено експериментальну установку (рис. 3.1), що дає змогу вимірювати коефіцієнт динамічної в'язкості до 10<sup>7</sup> Па·с у діапазоні температури до 800 °С. Оцінена похибка експериментальних досліджень не перевищує 10–15 %.

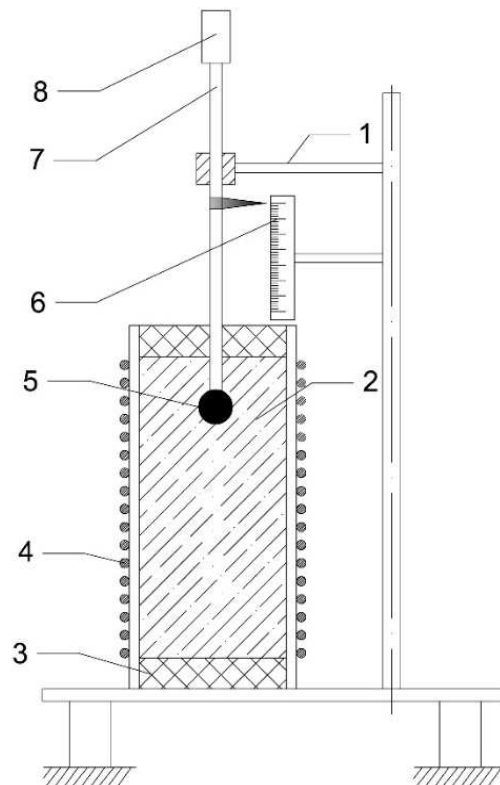


Рис. 3.1. Експериментальна установка для вимірювання коефіцієнта динамічної в'язкості вуглецевих композитних матеріалів: 1 – штатив; 2 – досліджуваний матеріал; 3 – теплоізоляція; 4 – периферійний нагрівник; 5 – металева куля; 6 – індикатор переміщення; 7 – навантажувальна штанга; 8 – додаткова вага

Установка представляє собою теплоізолюваний циліндр, що заповнюється досліджуваною масою, діаметром 120 мм і завдовжки 500 мм з регульованим електричним периферійним нагрівником. У циліндр опускається гладка сталева куля діаметром 12 мм, з'єднана з навантажувальною штангою для розміщення додаткової маси. Реєструючи час та переміщення індикатора занурення кулі, визначається момент встановлення сталої швидкості та її значення. Коефіцієнт динамічної в'язкості розраховується за формулою (3.3).

Для проведення досліджень на розробленій експериментальній установці обрано три види вуглецевого композиційного матеріалу: вуглецева маса № 1 –  $22 \pm 2$  % зв'язуючого; вуглецева маса № 2 –  $27,6 \pm 2$  % зв'язуючого; електродна маса –  $25 \pm 3$  % зв'язуючого. Склад досліджуваних зразків наведено в табл. 3.1.

Експериментальні дослідження проведені для діапазону температури від  $110^\circ\text{C}$  до  $190^\circ\text{C}$ . Результати вимірів коефіцієнта динамічної в'язкості та апроксимуючі функції представлені на рис. 3.2–3.4.

Визначено, що в діапазоні температури від  $120^\circ\text{C}$  до  $170^\circ\text{C}$  коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості для різних вуглецевих мас складає:  $(15,37 \dots 1,826) \cdot 10^5$  Па·с для вуглецевої маси № 1;  $(8,085 \dots 0,609) \cdot 10^5$  Па·с для вуглецевої маси № 2;  $(1,18 \dots 0,0518) \cdot 10^5$  Па·с для електродної маси. Отримані залежності мають спадаючий зі зростанням температури експоненціальний характер.

Таблиця 3.1. Склад досліджуваних зразків вуглецевої маси

Зразок маси	Вміст зв'язуючого, %	Наповнювач	
		Складова наповнювача	Вміст, %
Вуглецева маса № 1	$22 \pm 2$	Термооброблений антрацит, фракція (0–6) мм	70
		Графітована вуглецева сировина, фракція (0–6) мм	30
Вуглецева маса № 2	$27,6 \pm 2$	Графітована вуглецева сировина, фракція (0–10) мм	70
		Графітована вуглецева сировина, фракція (0–0,05) мм	30
Електрод-на маса	$25 \pm 3$	Термооброблений антрацит, фракція (0–16) мм	70
		Термооброблена вуглецевий сировина, фракція (0–0,5) мм	30

Найбільше на в'язкість впливає вміст зв'язуючого в масі. Так, завдяки підвищенню масової частки пеку в суміші на 5 %, в'язкість знижується майже вдвічі. Окрім того, суттєвим є вплив наявності в рецептурі крупної фракції більшої за 10 мм, що відзначається для електродної маси.

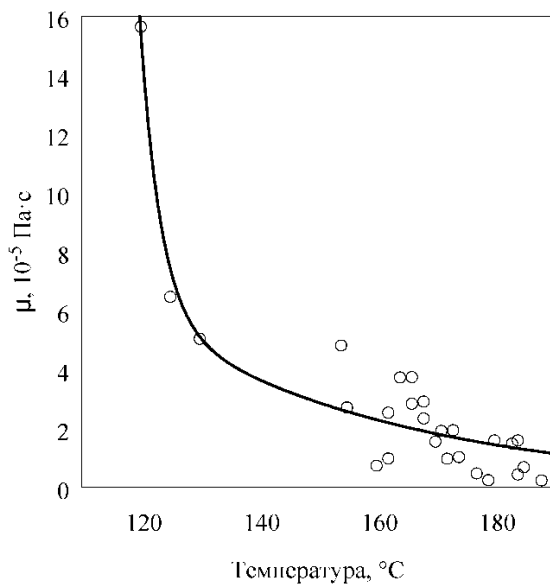


Рис. 3.2. Температурна залежність коефіцієнта динамічної в'язкості для вуглецевої маси № 1,  $R^2 = 0,79$

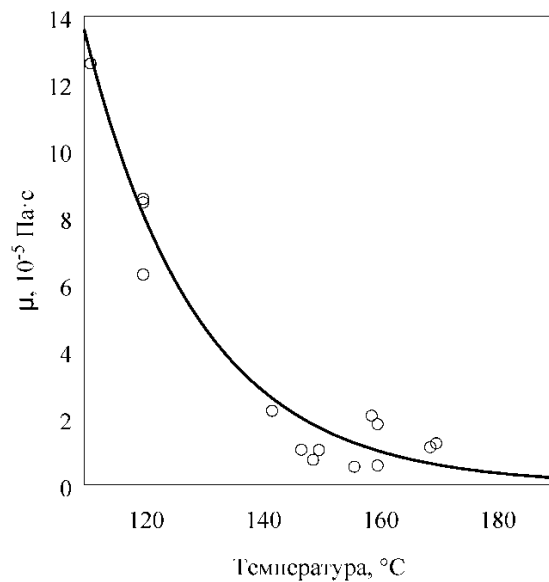


Рис. 3.3. Температурна залежність коефіцієнта динамічної в'язкості для вуглецевої маси № 2,  $R^2 = 0,9$

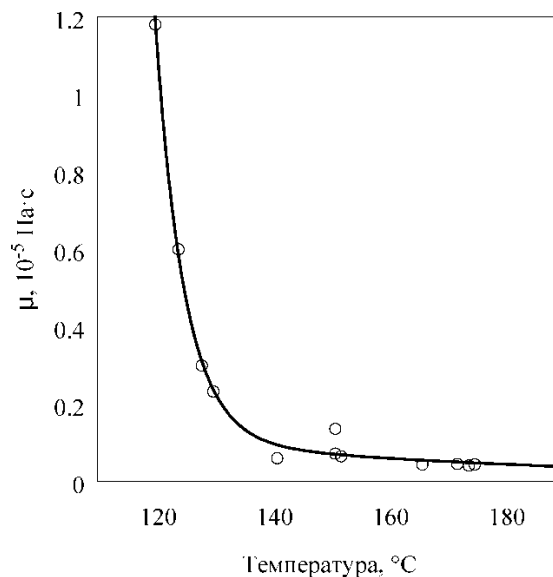


Рис. 3.4. Температурна залежність коефіцієнта динамічної в'язкості для електродної маси,  $R^2 = 0,99$

### 3.2. Експериментальна установка, методика та результати дослідження зсувного напруження вуглецевої маси

У технологічному процесі виготовлення електродних заготовок процес екструзії кокосопекової або електродної маси через пресовий інструмент займає особливе місце, оскільки на цьому етапі відбувається як надання первинної форми виробам, так і закладаються їхні основні фізичні властивості [48]. Як відомо, електродна маса представляє собою композит, який складається із твердого вуглецевого наповнювача і зв'язуючого – пеку. Залежно від температури пек може перебувати у вигляді пластичної маси або рідини. У процесі пресування заготовок пек також має виконувати функції змащення



поверхні мундштука для зменшення зсувних напружень на поверхні контакту заготовок з пресовим інструментом, що у свою чергу визначає залишкові напруження та гладкість поверхонь виробів, вихід бракованої продукції тощо. Якість змащування залежить від температурного режиму й швидкості пресування та фізико-хімічних властивостей пеку та електродної маси в цілому.

Тому дані з дослідження залежності зсувних напружень від температурного режиму екструзії електродної маси є необхідними для розробки раціональних регламентів пресування електродних заготовок, зокрема, з використанням математичного моделювання процесу, де значення зсувних напружень потрібні як граничні умови.

Для вимірювання температурної залежності напруження зсуву електродної маси розроблена спеціальна установка, принцип вимірювань якої полягає в створенні і фіксації певного зусилля, за якого запресований матеріал в термостатованому циліндрі зсувається з місця. Схематично вимірювальна установка зображена на рис. 3.5.

Для визначення напруження зсуву  $\tau_{sh.stress}$  використовується формула

$$\tau_{sh.stress} = \frac{F}{f}, \quad (3.4)$$

де  $F$  – сила, яку необхідно прикласти до запресованої в циліндр маси, щоб зсунути її з місця, Н;  $f = \pi D l$  – площа контакту дослідної маси з вимірювальним циліндром, м<sup>2</sup>;  $D$  – діаметр вимірювального циліндра, м;  $l$  – довжина вимірювальної ділянки, м.

Для відповідності виробничим умовам електродна маса запресовувалася у циліндр під тиском рівним тиску заводського пресового інструменту.

Вимірювання проведені для діапазону зміни температур 90–170 °С із застосуванням зусилля не більше 480 Н та наведені на рис. 3.6.

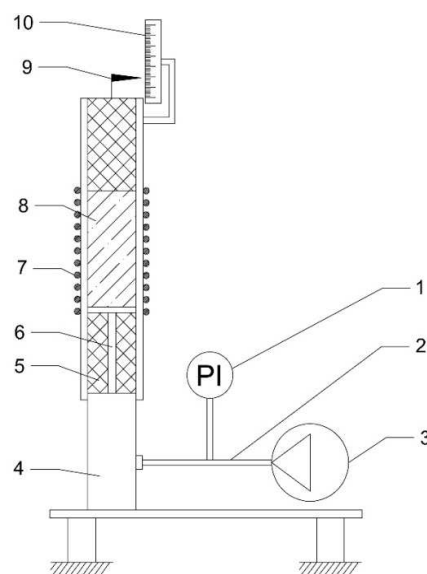


Рис. 3.5. Установка для вимірювання зсувних напружень: 1 – манометр; 2 – повітропровід; 3 – компресор; 4 – повітряний циліндр; 5 – теплоізоляція; 6 – поршень; 7 – нагрівник; 8 – дослідна маса; 9 – показчик; 10 – лінійка

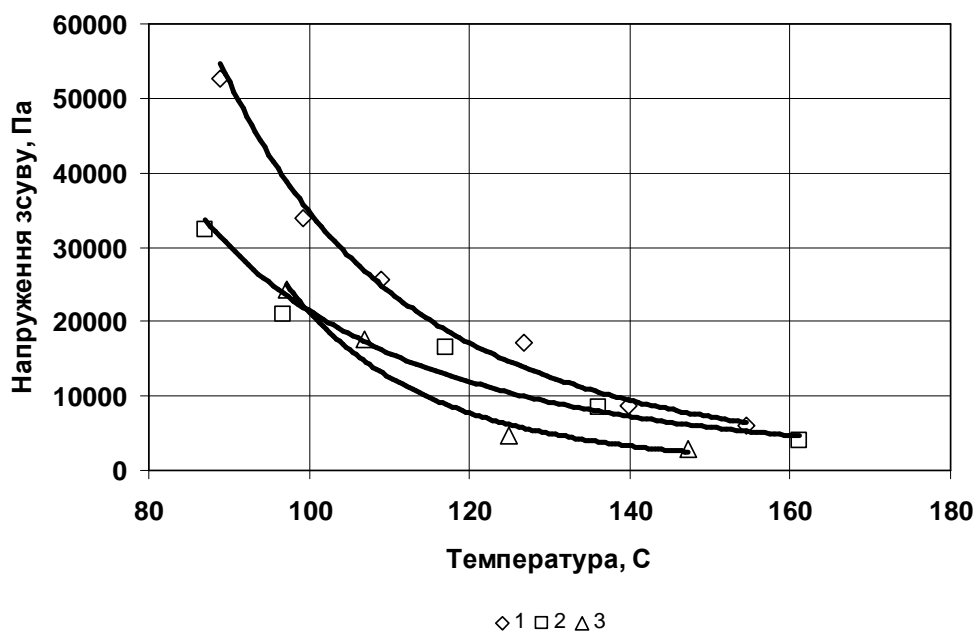


Рис. 3.6. Температурна залежність напруження зсуву для різних електродних мас (маси умовно позначені номерами: 1, 2, 3)

Електродні маси в діапазоні зміни температур 120–150 °C мають найменші значення зсувних напружень. Найбільше значення напруження зсуву має електродна маса № 1. Результати досліджень показують, що зсувні напруження за температури більшої 150 °C практично не змінюються для всіх досліджуваних коксопекових мас. Похибка отриманих даних з напруження зсуву оцінюється в межах 10–15 % [49].

### 3.3. Методика та результати енерготермоаудиту пресового інструменту

Метою дослідження є отримання експериментальних даних з силового, енергетичного та температурного стану промислового пресового інструменту під час кампанії формування великогабаритних вуглецевих заготовок прямокутного перерізу.

Дослідження енерготермоаудиту виконувалося на промисловому пресовому інструменті ПрАТ «Укрграфіт». Схему пресового інструменту схематично наведено на рис. 3.7. Основними його конструктивними елементами є масний циліндр, плунжер та мундштук, в якому відбувається процес формування.

Масний циліндр представляє собою теплоізовану циліндричну камеру з електричним нагрівником, що розташований по всій його поверхні. Він є нерухомою частиною пресового інструменту, тому має допоміжні системи, які дають заповнювати його вуглецевою масою [42].

Конструкція мундштука передбачає можливість його заміни та реалізує дві зони деформування: західну й калібрувальну. У західній зоні відбувається значне деформування маси й перехід від круглого профілю до прямокутного, який відповідає геометрії заготовки, а в калібрувальній – остаточно формується кінцевий профіль виробу. Для створення потрібної температури поверхні

мундштука та формованої маси використовуються два основних нагрівники: в західній і калібрувальній частинах, а також чотири допоміжних, які розташовані в кутах прямокутного відхідного отвору.

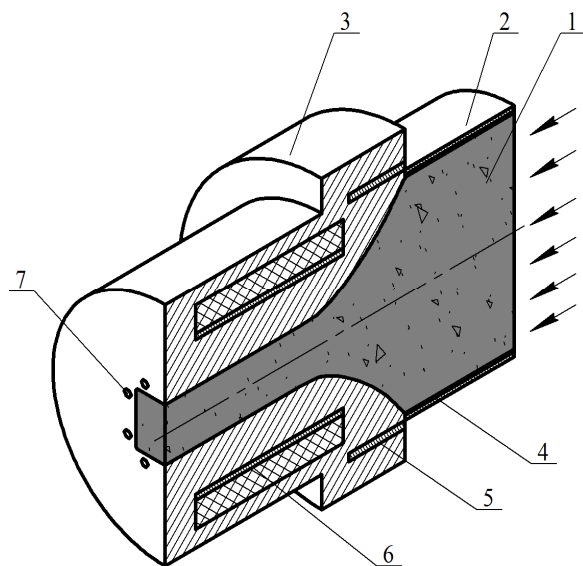


Рис. 3.7. Схема пресового інструменту для формування вуглецевої маси методом екструзії: 1 – вуглецева маса; 2 – масний циліндр; 3 – мундштук; 4 – нагрівник масного циліндра; 5 – нагрівник західної частини мундштука; 6 – нагрівник калібрувальної частини мундштука; 7 – додаткові нагрівники

Гідравлічна система преса розвиває зусилля до 62 МН, яке передається плунжером до маси. Підпресування проводиться за умови  $20 \pm 2$  МПа, а рекомендований діапазон самого пресування складає 2–6 МПа.

Режим пресування й температурний режим процесу контролюється сучасною електронно-вимірювальною апаратурою, а регулювання здійснюється як автоматично, так і оператором.

Формування вуглецевих виробів методом екструзії складається з таких основних операцій:

- заповнення масного циліндра масою;
- розігрів маси до заданого рівня температури;
- підпресування;
- пресування та маркування виробів;
- відрізання заготовки заданої довжини;
- охолодження;
- промисловий контроль якості виробів.

Підпресування – це операція ущільнення маси за умови закритого відхідного отвору мундштука запірною плитою. Під час підпресування досягається високий ступінь ущільнення маси, що впливає на характер її руху крізь мундштук. Це дає змогу отримувати заготовки з високою густиною та однорідною структурою.

Під час пресування маса видавлюється крізь мундштук під дією плунжера. Її рух характеризується шаровою структурою: в масному циліндрі – шари рухаються паралельно один одному, а в мундштуку – центральні шари

дещо випереджають периферійні. Таке розшарування виникає внаслідок того, що матеріал в центрі проходить менший шлях, чим на периферії, а також із-за взаємодії стінок мундштука з масою. Крім того, під час руху твердий наповнювач, який має неправильну форму гранул, переорієнтується таким чином, щоб максимальний розмір частинок був повернутий за напрямком пресування матеріалу. Зазначені особливості призводять до утворення характерної для пресування крізь мундштук структури заготовок, що відрізняється чітко вираженою анізотропією властивостей у перпендикулярному до повздовжньої осі виробу напрямку [26, 50, 51].

Для отримання безбракових високоякісних вуглецевих виробів вирішальним чинником є витримка технологічного регламенту, що включає підтримку певних діапазонів температури в різних частинах пресового інструменту, величини тиску й швидкості пресування. Регламент пресування визначається експериментальним шляхом на підставі аналізу виникнення бракованих виробів (заготовок).

Найчастіше всього брак проявляється як тріщини та задирки в тілі заготовок. За наявності вказаних дефектів у виробі він відбраковується і не потрапляє на подальшу термічну обробку, а подрібнюється й використовується як складова наповнювача іншої продукції, що призводить до додаткових витрат енергетичних і матеріальних ресурсів.

Причини, що призводять до утворення дефектів у заготовках, пов'язані як зі складом вуглецевої маси, а саме із вмістом зв'язуючого та крупністю частинок наповнювача, так і з температурним режимом пресового інструменту. Зазначені чинники тісно пов'язані між собою і впливають один на одного [50, 51]. Так, за високого вмісту зв'язуючого в масі, для її ефективного формування необхідно витримувати дещо більш низькі температури пресового інструменту через підвищену пластичність та ймовірність деформування й викривлення форми виробу. З іншого боку, перегрів або недогрів поверхні мундштука призводить до градієнта швидкості в зонах контакту з масою та утворення тріщин, як у повздовжньому, так і в поперечному напрямках. Тому бездефектне пресування базується на балансі між реологічними властивостями композитної вуглецевої маси й тепловим режимом пресового інструменту, який досягається завдяки досвіду технолога та оператора виробництва.

Для формування заготовок використовуються різні за своєю рецептурою композитні вуглецеві маси. Електродні маси складаються із зв'язуючого (пеки різного походження) і наповнювача (вуглецевий сипучий матеріал – антрацит, кокс, термооброблена вуглецева сировина тощо), які змішуються до високого ступеня однорідності. Рецептура, а саме вміст зв'язуючого й гранулометричний склад наповнювача, визначає технологічний режим процесу пресування [52].

Дослідження фізичних процесів на промисловому обладнанні та в умовах виробництва потребує розробки спеціальної програми досліджень і відповідного вимірювального обладнання. Складнощі під час проведення експериментальних досліджень полягають у необхідності виконання вимірювань таким чином, щоб мінімізувати їх вплив на процес та отримувати максимально повну й різносторонню картину фізичних явищ [53].

Для проведення експериментальних досліджень обрана кампанія пресування вуглецевої маси, характеристики якої представлено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. Склад вуглецевої маси на експериментальній кампанії пресування

Вміст зв'язуючого, %	Наповнювач	
	Склад наповнювача	Вміст, %
27,6±2	Графітована вуглецева сировина, фракція (0–10) мм	70
	Графітована вуглецева сировина, фракція (0–0,05) мм	30

Для вказаної вуглецевої маси технологічний процес проводиться за технологічним регламентом, який наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Технологічний регламент експериментальної кампанії пресування

Параметр	Значення
Температура в масному циліндрі, °С	105–120
Температура в західній частині мундштука, °С	115–150
Температура в калібрувальній частині мундштука, °С	115–150
Тиск підпресування, МПа	20±2
Тривалість підпресування, хв	3–5
Тиск пресування, МПа	2–6, макс. 9
Швидкість пресування, м/хв	0,7–1,0

Штатне вимірювальне обладнання на пресовому інструменті включає: ватметри на всіх електричних нагрівників (похибка вимірювання  $\pm 0,1$  %); електронний датчик тиску (похибка вимірювання  $\pm 0,5$ –1 %); хромель-алюмелеві термопари (похибка вимірювання  $\pm 1,7$  °С) [54, 55]. Схему розміщення штатних термодатчиків у корпусі мундштука наведено на рис. 3.8.

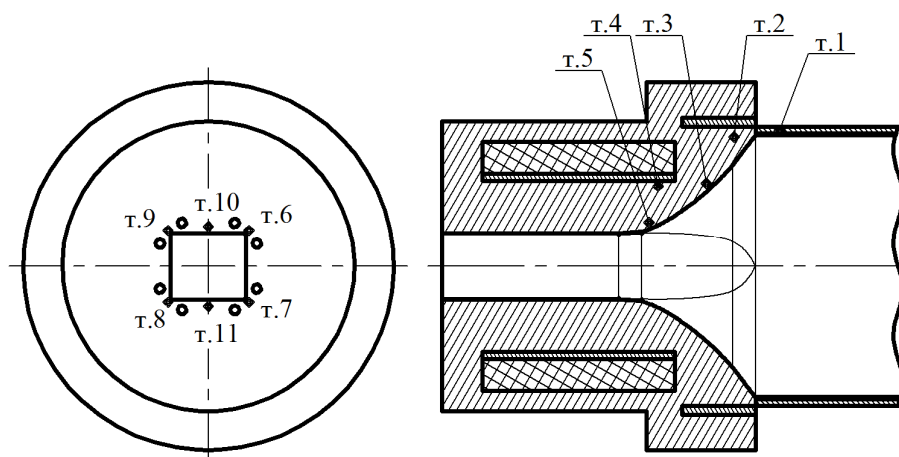


Рис. 3.8. Схема розміщення штатних термометричних датчиків в корпусі мундштука:  
т.1–т.11 – нумерація штатних термометричних датчиків

Тривалість кампанії пресування перевищує 10 діб. Кампанія починається із завершення підготовки потрібної кількості маси, паралельно з цим відбувається розігрів пресового інструменту. Далі маса завантажується в

масний циліндр, підпресовується й формується в заготовки – це один етап пресування. Такий цикл продовжується залежно від потреб та плану виробництва [56].

Експериментальні дослідження проведені для чотирьох безбракових етапів усередині кампанії пресування, тобто для чотирьох завантажень масного циліндра.

На рис. 3.9. наведено графік зміни тиску підпресування в часі та власне пресування. Сірим кольором відділено етап пресування.

Для дослідної кампанії тиск підпресування на різних її етапах складав 20,4–20,8 МПа, перша заготовка (розпар) пресується під тиском 1,4–2,1 МПа, а тиск пресування заготовок – 2,1–2,6 МПа. З наведених даних видно, що етапу пресування передують підпресування із значним прикладеним зусиллям для ущільнення вуглецевої маси. Безпосередньо етап пресування починається з видавлювання першої заготовки (розпар) з зусиллям, меншим для нормального процесу. Це пов'язано з тим, що розпар є перегрітим матеріалом, а отже має меншу в'язкість і коефіцієнт тертя об мундштук. Крім того, в ньому присутній матеріал з попереднього завантаження масного циліндра, що негативно впливає на якість заготовок. Розпар взагалі вважається браком і тому в подальшому не використовується.

Електричний нагрівник масного циліндра має потужність близько 22 кВт та працює в автоматичному режимі, що контролюється датчиком температури *1* з налаштуванням значень у діапазоні 114–116 °С. Графік зміни електричної потужності та температури, що вимірюється в масному циліндрі наведено на рис. 3.10.

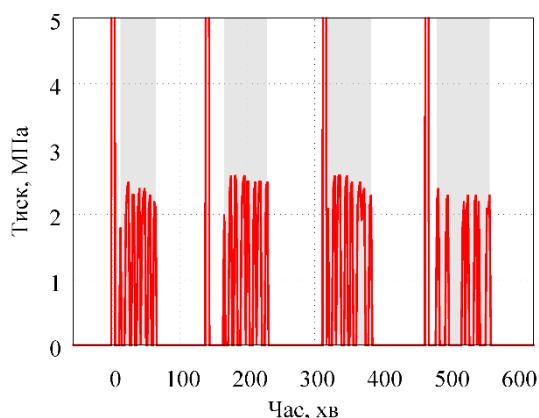


Рис. 3.9. Графік зміни тиску в продовж чотирьох етапів пресування

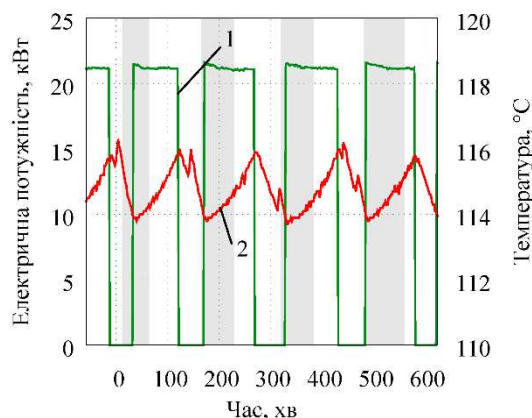


Рис. 3.10. Графік зміни електричної потужності та температури для масного циліндра: 1 – електрична потужність; 2 – температура в т. 1

Зміну електричної потужності та температури в контрольованих точках західної частини мундштука наведено на рис. 3.11. Нагрівник західної частини вмикається оператором після завершення підпресування. Його потужність складає 32–34 кВт. Далі система автоматики контролює роботу нагрівника на підставі показів термодатчика точка (т.) 2, які мають бути в діапазоні 134–

136 °С, тому він вмикається періодично. Через певний час після завершення етапу пресування нагрівник вимикається до наступного циклу.

Температура поверхні західної частини мундштука (т. 3) характеризуються значною інертністю відповідно до температури в т. 2. Тому максимальне значення близько 125 °С спостерігається в проміжках між етапами пресування. Під час формування заготовок температура поверхні західної частини мундштука знаходиться в діапазоні 121–123 °С.

Графік зміни електричної потужності та температури в контрольованих точках калібрувальної частини мундштука наведено на рис. 3.12. Контроль роботи нагрівника виконується автоматично, виходячи з показів температурних датчиків тт. 4 і 5, потужність якого складає 44–47 кВт. Система автоматики вмикає нагрівник за умови досягнення температури 123 °С у т. 5, а вимикає за 134 °С за показами датчика т. 4.

Такий режим роботи призводить до того, що під час пресування спостерігається зниження температури поверхні калібрувальної частини мундштука через теплообмін з масою, яка рухається. Температура в т. 5 упродовж пресування змінюється від 128 °С до 122 °С, а вже після завершення формування заготовок починається нагрівання поверхні до 128–129 °С.

Додаткові нагрівники, які встановлені по кутах каналу калібрувальної частини мундштука, призначені для зниження впливу теплових кутових ефектів. Система автоматики підтримує сталий рівень температури в діапазоні 115–120 °С за показами термопар тт. 6–9. Потужність додаткових нагрівників складає 1,8 кВт. На рис. 3.13 наведено зміну температури в т. 6–9 впродовж експериментальної кампанії пресування.

Покази термопар, розташованих на верхній та нижній поверхнях калібрувальної частини мундштука (т. 10, 11), наведено на рис. 3.14.

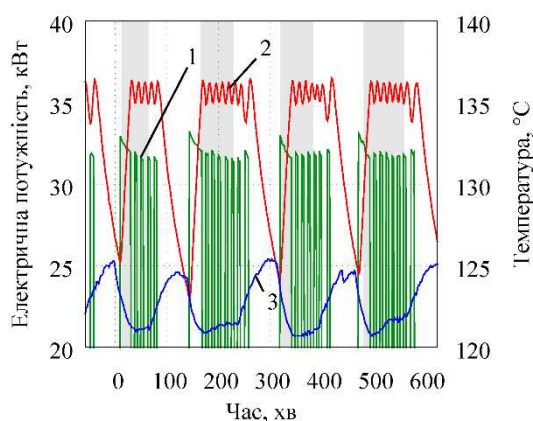


Рис. 3.11. Графік зміни електричної потужності та температури в контрольованих точках західної частини мундштука: 1 – електрична потужність; 2 – температура в т. 2; 3 – температура в т. 3

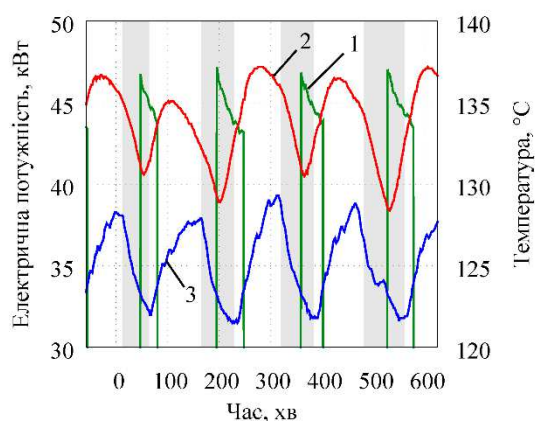


Рис. 3.12. Графік зміни електричної потужності та температури в контрольованих точках калібрувальної частини мундштука: 1 – електрична потужність; 2 – температура в т. 4; 3 – температура в т. 5

З наведених даних випливає, що температура вихідної поверхні мундштука залежить від роботи додаткових нагрівників і процесу теплообміну



між рухомою масою та стінками пресового інструменту. Крім того, істотний вплив на тепловий режим має масивна плита, що закриває вихідний отвір мундштука після закінчення пресування та до кінця підпресування. Так, інтенсивний зростання й падіння температури у тт. 10, 11 у проміжках часу між пресуванням пов'язаний саме з теплообміном між гарячим мундштуком та більш холодною плитою.

Різниця по температурі між симетрично розташованими датчиками може бути пов'язана з різними умовам теплообміну: верхня частина мундштука (т. 10) охолоджується вільною конвекцією; нижня частина мундштука (т. 11), є більш ізольованою через конструктивні елементи пресового інструменту.

Упродовж дослідної кампанії пресування отримано якісні вуглецеві заготовки без дефектів, що свідчить про можливість застосування даного регламенту.

Наведені на рис. 3.9–3.14 дані вказують на циклічність процесу формування крізь мундштук, що дає підставу для осереднення та представлення результатів у вигляді регламенту проведення етапу пресування в безрозмірній формі за часом (рис. 3.15–3.17).

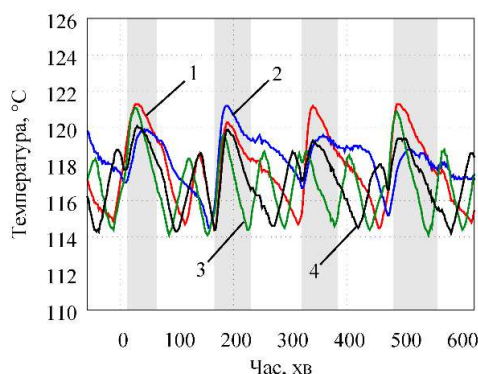


Рис. 3.13. Графік зміни температури в точках біля додаткових нагрівників: 1 – т. 6; 2 – т. 7; 3 – т. 8; 4 – т. 9

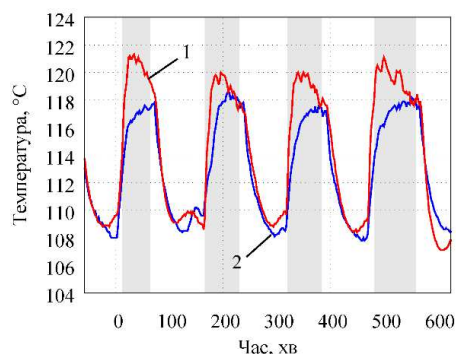


Рис. 3.14. Графік зміни температури на верхній та нижній поверхнях калібрувальної частини мундштука: 1 – т. 10; 2 – т. 11

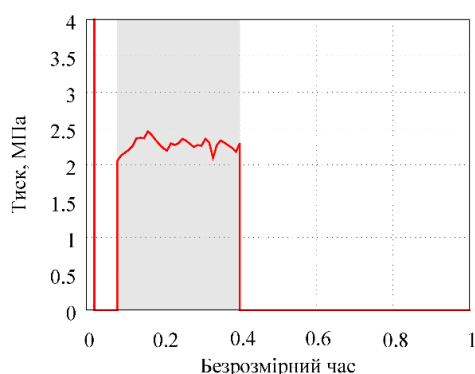


Рис. 3.15. Регламент етапу пресування в безрозмірній формі за часом, тиск пресування

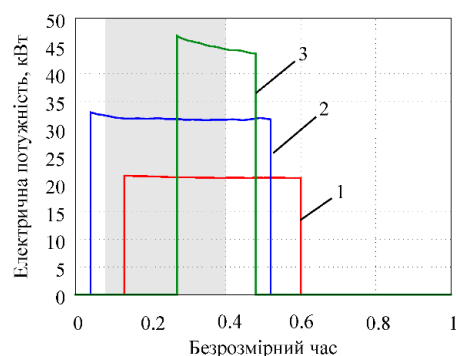


Рис. 3.16. Регламент етапу пресування в безрозмірній формі за часом, електрична потужність: 1 – потужність нагрівника масного циліндра; 2 – потужність нагрівника західної частини мундштука; 3 – потужність нагрівника калібрувальної частини мундштука



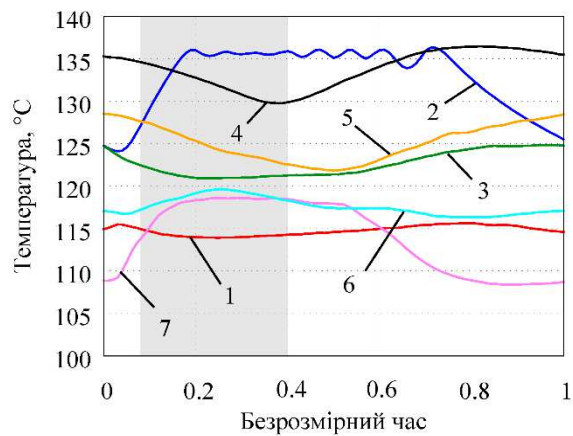


Рис. 3.17. Регламент етапу пресування в безрозмірній формі за часом (температура штатних точок вимірювання): 1 – т. 1; 2 – т. 2; 3 – т. 3; 4 – т. 4; 5 – т. 5; 6 – т. 6-9; 7 – т. 10, 11

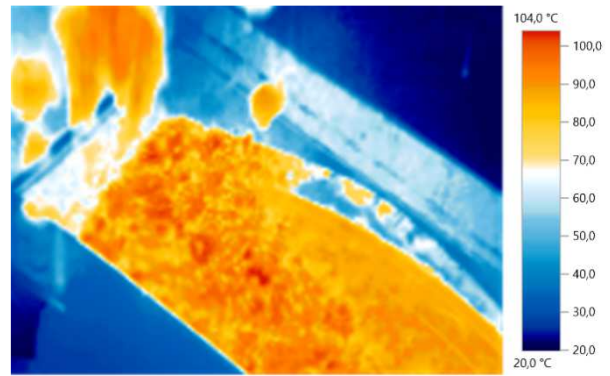


Рис. 3.18. Термограма поверхні маси в масному циліндрі

Додатково до збору та аналізу показників штатного вимірювального обладнання проведена серія натурних досліджень теплового стану обладнання з використанням спеціалізованих вимірювальних засобів. Дослідження проведено з використанням тепловізора Testo 875 (похибка вимірювань становить  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ), пірометра Agema ThermoPoint 62 (похибка  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) та контактних термометричних датчиків на базі хромель-алюмелевих термопар (похибка  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ).

Для аналізу температури маси, що перебуває в масному циліндрі, досліджено температури її поверхні після завантаження й до початку підпресування. На рис. 3.18 наведено термограму поверхні маси.

Розподіл температури на поверхні матеріалу в масному циліндрі характеризується середнім значенням  $91^{\circ}\text{C}$  й максимальним  $104^{\circ}\text{C}$ . Вказані величини дають оціночне уявлення про температуру в масному циліндрі через інтенсивний теплообмін з оточуючим повітрям.

Вимірювання температури внутрішньої поверхні масного циліндра проведено через 40 хв після завершення етапу пресування. Температуру, що виміряна за допомогою пірометра, наведено на рис. 3.19.

Визначено, що за даних умов температура змінюється в середньому в діапазоні  $80\text{--}86^{\circ}\text{C}$  від плунжера до мундштука, відповідно. Нерівномірність температури в радіальному напрямку складає  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

З використанням тепловізора й пірометра за розробленою схемою вимірювання (рис. 3.20), визначено температури бічних поверхонь заготовок під час пресування. На рис. 3.21 наведено усереднені дані зміни температури правої, лівої та верхньої поверхонь заготовок під час екструзії вуглецевої продукції. На рис. 3.22 наведено термограму в момент пресування заготовки.

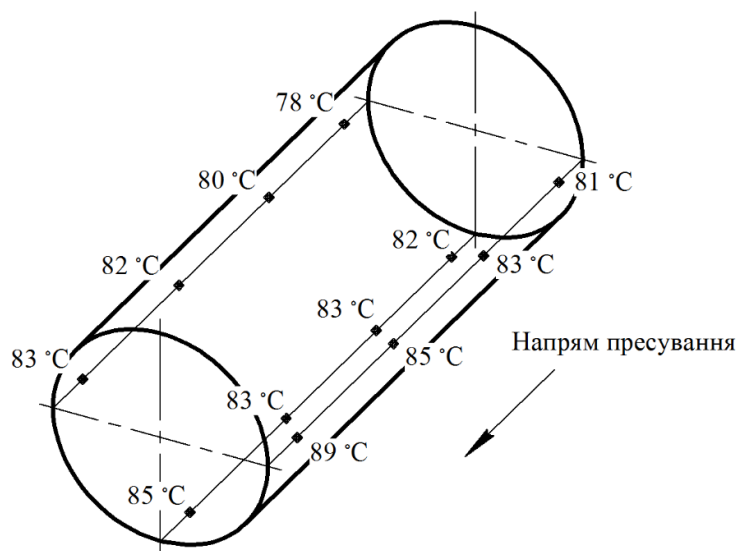


Рис. 3.19. Температура внутрішньої поверхні масного циліндра

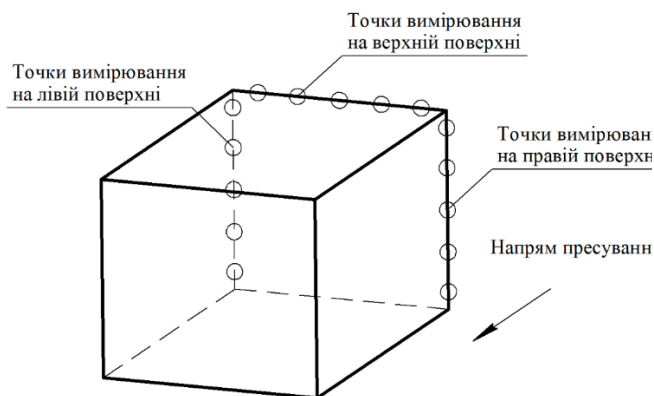


Рис. 3.20. Схема експериментального визначення температури бічних поверхонь заготовки

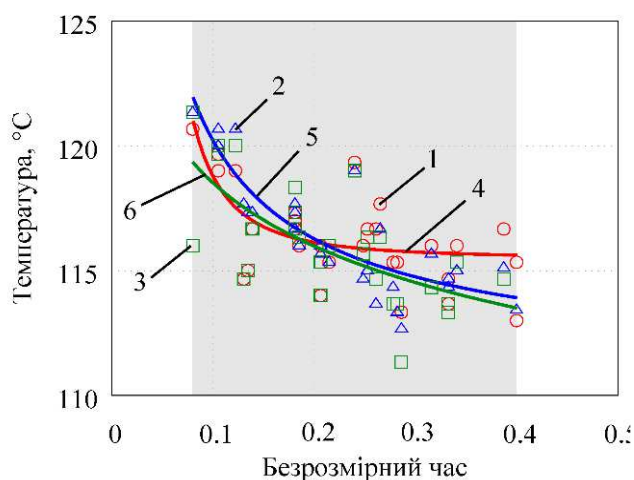


Рис. 3.21. Експериментальні значення зміни осередненої температури на поверхнях заготовок: 1 – верхня поверхня; 2 – ліва поверхня; 3 – права поверхня; апроксимуюча залежність: 4 – верхня поверхня; 5 – ліва поверхня; 6 – права поверхня

З наведених даних видно, що впродовж етапу пресування температура бічних поверхонь температура заготовки знижується в діапазоні від  $121 \pm 2$  °C до  $114 \pm 2$  °C. При цьому верх заготовки охолоджується менш інтенсивно.

Для відрізання заготовок використовується ніж з водяним охолодженням. Результат його дії на термічний стан сформованої маси виражається в локальних зонах більш низької температури в місцях зрізу (рис. 3.23). Зважаючи на це, для визначення розподілу температури по перерізу заготовки необхідно проводити вимірювання в точках, заглиблених у масу. Для вирішення цієї задачі розроблено схему вимірювання, яка передбачає швидку й одночасну установку термометричних датчиків на глибину 50 мм в тіло заготовки (рис. 3.24, а).

Осереднені температурні поля відхідного перерізу заготовки в різні моменти часу пресування наведено на рис. 3.24,б –г.

Усереднені значення температури центра відхідного перерізу заготовки представлено на рис. 3.25.

Отримані експериментальні дані показують певну несиметричність температурного поля у відхідному перерізу заготовки, що може бути пов'язано з різною інтенсивністю роботи додаткових нагрівників. Однак, враховуючи швидкоплинність процесу формування й високе значення теплоємності вуглецевої маси ( $c_p=1750$  Дж/(кг·К)) можна стверджувати, що температура центра заготовки відповідає температурі маси в масному циліндрі. Таким чином, середнє значення цієї температури на етапі пресування складає 95–99 °С.

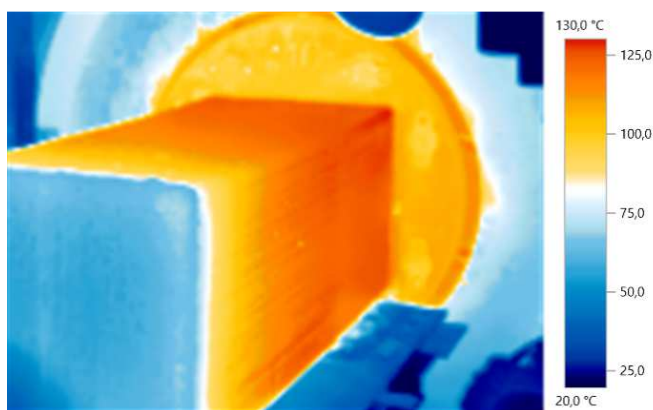


Рис. 3.22. Температурне поле поверхні заготовки в момент пресування

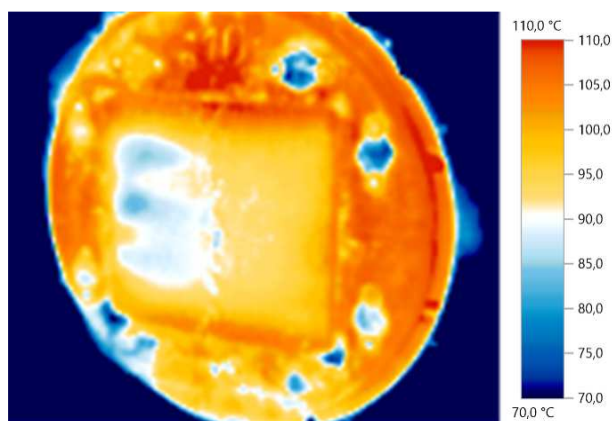


Рис. 3.23. Температурне поле зрізу заготовки

У результаті проведених експериментальних досліджень температурного стану пресового інструменту й вуглецевої маси встановлено, що процес формування в промисловому пресі має циклічний характер, який можна уявити у вигляді залежностей осереднених вимірних величин від безрозмірного часу, що відображає повний етап пресування виробів.

Проведені дослідження розподілу температури поверхонь і внутрішнього вихідного перерізу маси в стані пресування дає змогу зробити висновок, що впродовж етапу пресування температура різних частин мундштука змінюється на рівні 5–10 °С. Встановлено, що за рахунок теплообміну та нерівномірності в роботі нагрівників має місце охолодження вуглецевої маси під час її формування. Визначено, що поверхні виробів охолоджуються на 9 °С (від 122 °С до 113 °С), а тіло заготовки на 7 °С (від 103 °С до 96 °С). Крім того, встановлено наявність несиметричності температурного поля виробів, що пов'язано з нагрівниками пресового інструменту, що проявляється в масному циліндрі та на відхідному перерізі заготовки.

Виявлені явища однозначно вказують на нераціональність вибору режиму пресування і підвищену ймовірність отримання бракованих виробів, обумовлюють необхідність проведення подальших досліджень.

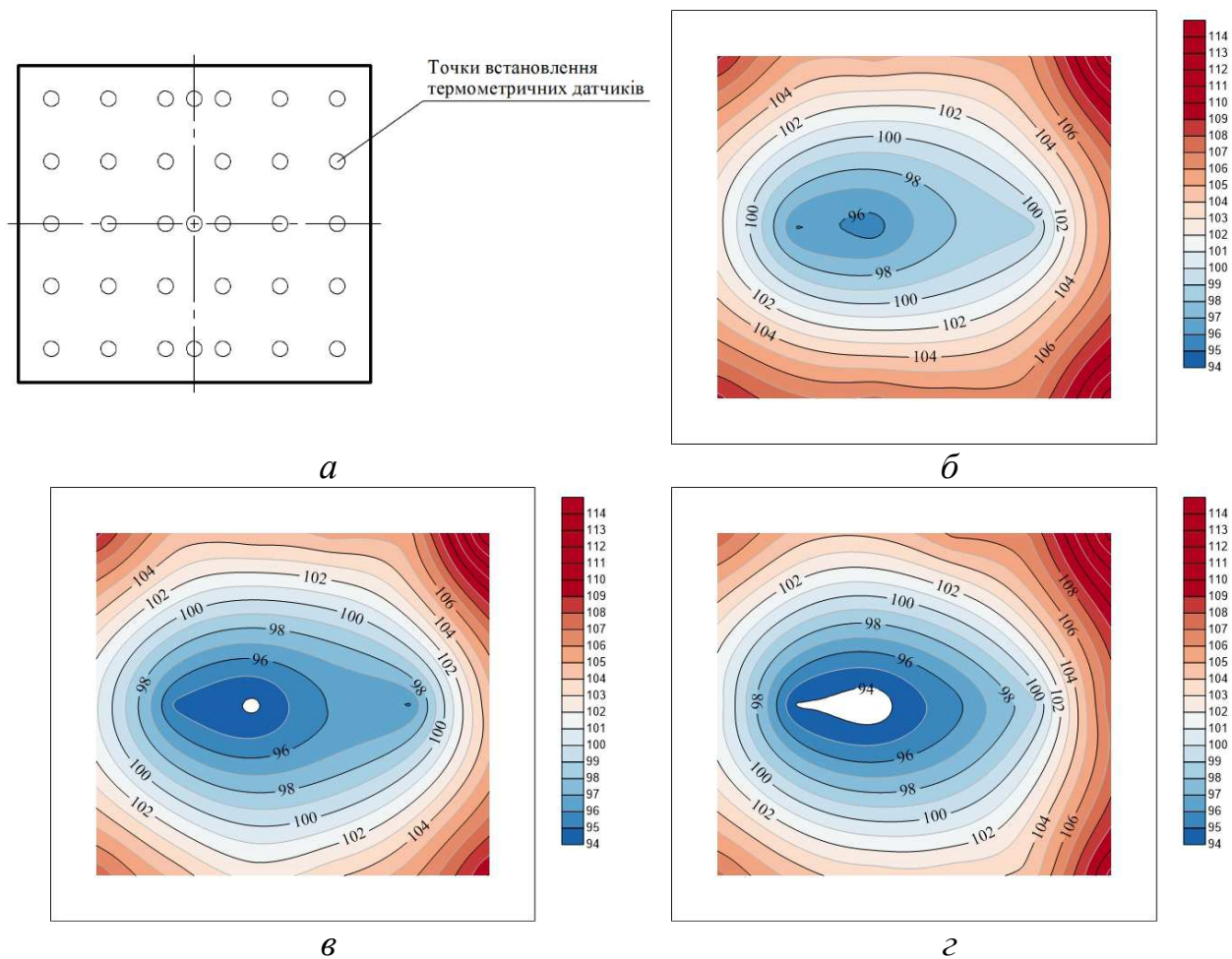


Рис. 3.24. Розподіл температури у відхідному перерізі заготовки : *а* – схема установки термометричних датчиків; *б – г* – температурне поле відхідного перерізі заготовки в різні моменти часу на етапі пресування: *б* – 0,1; *в* – 0,2; *г* – 0,4

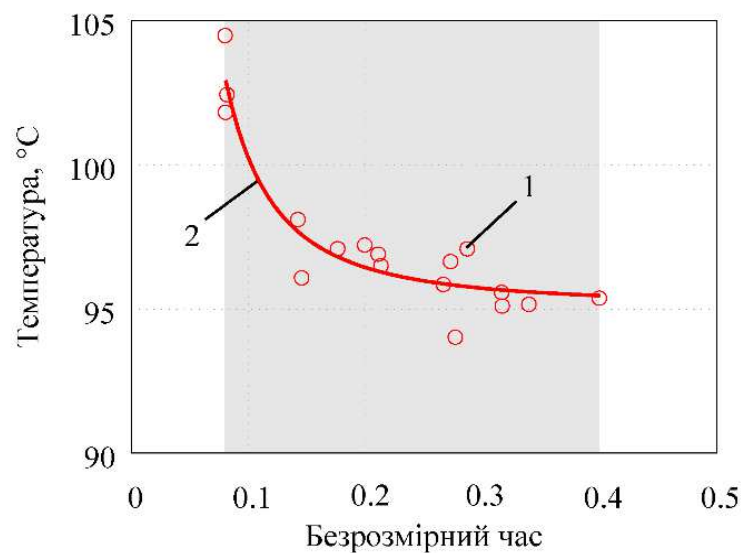


Рис. 3.25. Зміна з часом осередненої температури центра заготовки:  
1 – експериментальні значення; 2 – апроксимуюча залежність

### 3.4. Висновки до розділу 3

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) Отримано експериментальні дані з температурної залежності динамічної в'язкості коксопекової суміші за різного вмісту зв'язуючого. Встановлено, що найбільш суттєвий вплив на в'язкість має вміст зв'язуючого в масі. Так, завдяки підвищенню масової частки пеку в суміші на 5 %, в'язкість знижується майже вдвічі.

2) Отримано експериментальні дані з температурної залежності величини зсувних напружень на границі поверхні контакту електродна маса – мундштук для різного складу коксопекової суміші. Результати досліджень показують, що зсувні напруження за температури більшої 150 °С майже не змінюються для всіх досліджуваних коксопекових мас.

3) Проведено енерготермоаудит пресового інструменту під час екструзії електродних заготовок (блоків) у промислових умовах. Виявлено наявність несиметричності температурного поля виробів, що пов'язано з нагрівниками пресового інструменту, що проявляється в масному циліндрі та на відхідному перерізі заготовки. У результаті проведених експериментальних досліджень температурного стану пресового інструменту та вуглецевої маси визначено, що процес формування в промисловому пресі має виражений циклічний характер. Досліджено зв'язок між параметрами кінця й початку різних етапів пресування та встановлено, що для проведення безбракового процесу пресування вкрай важливим є моніторинг і контроль технологічних параметрів на всьому періоді виробничого циклу, включаючи час простою преса на завантаження нової порції вуглецевої маси.

4) Отримані експериментальні дані необхідні для проведення числового аналізу теплогідродинамічного стану пресового інструменту для задання теплофізичних властивостей, початкових і граничних умов. Експериментальні дані термоаудиту пресового інструменту також потрібні для верифікації математичної моделі теплогідродинамічного стану пресового інструменту.



## **4. ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ ВУГЛЕПЕКОВИХ ЕЛЕКТРОДНИХ ЗАГОТОВОК**

### **4.1. Початкові та граничні умови для числової моделі пресування електродних заготовок**

Для числового моделювання теплогідродинамічного стану обладнання в процесі пресування за граничні умови прийнято експериментальні дані, що отримано під час проведення енерготермоаудиту мундштука з електродними масами № 1, 2 (див. розділ 3).

У процесі проведення числового моделювання також потрібно врахувати циклічність процесу пресування за нових завантажень масного циліндра, а саме проведення не менш чотирьох циклів розрахунків для виходу на встановлені показники за температурою в точках розміщення штатних термопар. Моделювання кожної операції здійснюється в два етапи: екструзія матеріалу й завантаження матеріалу в масний циліндр (супроводжується нагріванням маси в масному циліндрі та охолодженням мундштука з вимкненими індукторами та включеними свічками – теновими нагрівниками):

1) Розв'язання нестационарної теплогідродинамічної задачі процесу пресування за умови ламінарного (на поверхні пресованого матеріалу) режиму течії в'язко-пластичної маси в мундштуку. За початкові умови приймаються: отриманий у п. 2 розподіл температури, якщо це не перший розрахунок, і нульові значення компонент швидкості в об'ємі маси, а в разі першого розрахунку за початковий розподіл температури приймається значення температури завантаженої маси (середнє значення).

2) Розв'язання нестационарної теплової задачі, постановка якої відповідає процесу завантаження матеріалу і встановлення температурного режиму до початку пресування. Тривалість завантаження маси становить 80 хв (на підставі натурних експериментів). За початкові умови приймається розподіл температури, який отримано в попередньому пункті.

Розглянемо докладніше кожен з етапів.

Перший етап характеризується безперервним рухом маси за умови ефективного значення швидкості, в якому враховуються тимчасові простой (процес відрізання і транспортування готового виробу) (рис. 4.1).

Як граничні умови на вході в мундштук задається ефективна швидкість видавлювання маси крізь мундштук, яка становить 0,00044 м/с. Ця швидкість розраховується на основі швидкості виходу заготовки з мундштука 0,011 м/с (визначена у виробничих умовах) і тривалості простою – 5 хв. На границі контакту мундштука та електродної маси задані умови ковзання. На виході з мундштука задається нульовий надлишковий тиск. На зовнішніх поверхнях пресового інструмента граничні умови третього роду з коефіцієнтом тепловіддачі 13 Вт/(м·К) і температурою навколишнього середовища 18 °С.

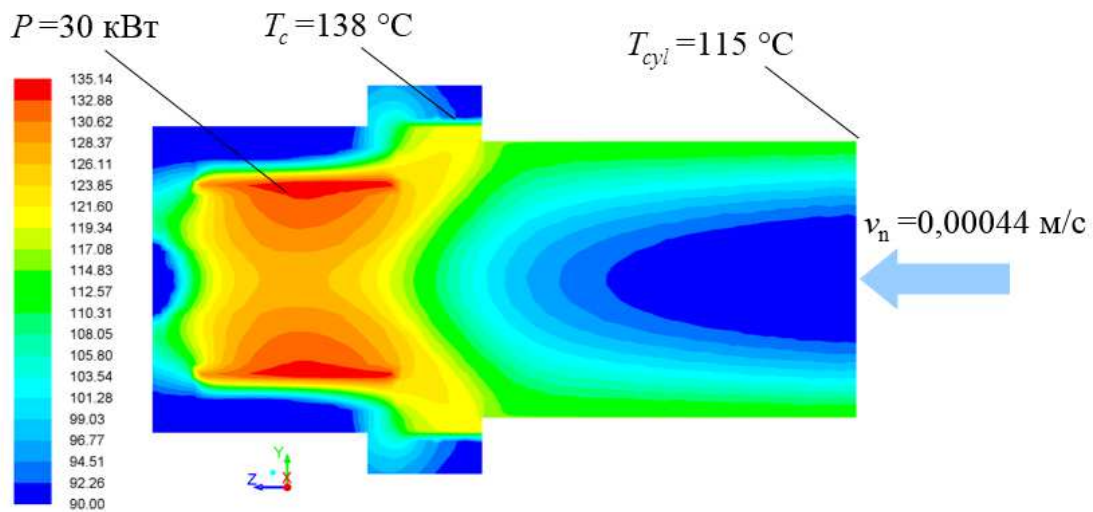


Рис. 4.1. Граничні умови числової моделі пресування (термограма відповідає стану пресового інструменту та завантаженої маси в початковий момент пресування)

Теплова потужність індуктора калібрувальної частини мундштука розрахована за відомими електричними параметрами індуктора вхідної частини мундштука та формулами електростатики [53], як сума величин теплових потужностей, які виділяються в спіралі індуктора і в об'ємі мундштука, що дорівнює 38 кВт.

Граничні умови першого роду задаються на поверхні індуктора на вхідній частині мундштука – 138 °C, на поверхнях «свічок» – 128 °C і на внутрішній поверхні масного циліндра – 115 °C.

Другий етап відповідає процесу завантаження свіжої маси. Реалізація цього етапу здійснюється на базі результатів моделювання температурних полів у масі й мундштуку, отриманих по завершенню процесу пресування (перший етап). При цьому розглядається нестационарна теплова задача без руху маси.

Як граничні умови на внутрішній поверхні масного циліндра граничні умови першого роду із завданням температури 115 °C і на свічках нагрівання 128 °C. Індуктори калібрувальної й вхідної частини при цьому вимкнено.

Під час завантаження створюється інтенсивний тепловідвід від переднього торця пресованого матеріалу крізь плиту для підпресування маси, на якій задаються граничні умови третього роду.

## 4.2. Верифікація числової моделі

Для числової реалізації запропонованої математичної моделі (2.5)–(2.12) (див. розд. 2) використано вільний відкритий програмний код для розв'язання задач обчислювальної гідродинаміки OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) [21].

Перевірка адекватності розробленої числової моделі процесу екструзії вуглецевих заготовок крізь мундштук виконана за допомогою експериментальних даних, що отримано на промисловому (див. розд. 3, рис. 3. 7) пресовому обладнанні (рис. 4.2), що також дало змогу задати коректні початкові та граничні умови.

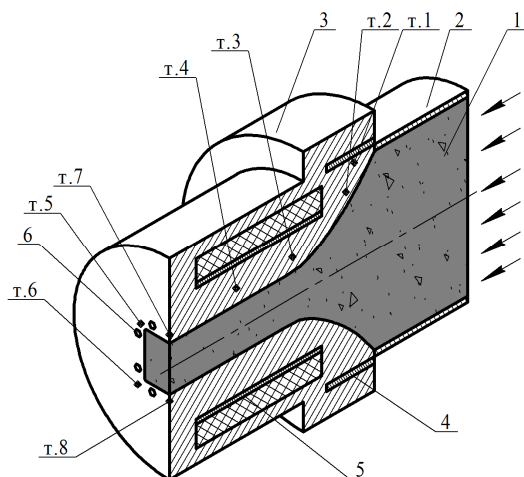


Рис. 4.2. Модель процесу пресування вуглецевих заготовок: 1 – пресмаса; 2 – масний циліндр; 3 – мундштук; 4, 5 – основні нагрівники; 6 – додаткові нагрівники; т. 1–8 – контрольні точки вимірювання температури

Розподіл температури на кінець кампанії пресування в середньому перерізі пресового інструменту та на поверхні маси наведено на рис. 4.3. Результати верифікації числової моделі теплогідродинамічного стану пресового інструменту за експериментальними даними наведено на рис. 4.4.

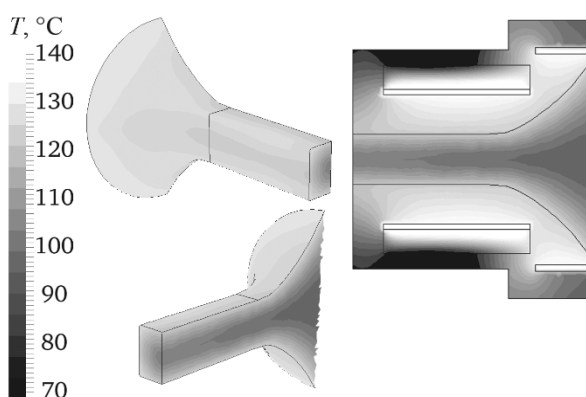


Рис. 4.3. Розподіл температури в середньому перерізі пресового інструменту та на поверхні пресмаси на кінець кампанії пресування

Аналіз результатів моделювання показує, що на температурне поле вуглецевої маси під час пресування заготовок значний вплив чинять основні нагрівники. Додатковий підігрів кутів для прямокутних заготовок забезпечує зменшення теплових кутових ефектів, що знижує ймовірність прилипання маси до стінок мундштука та, відповідно, дефектів у заготовках.

Зіставлення розрахункових та експериментальних даних за температурою в контрольних точках показує, що різниця між ними складає 4–10 %. Відповідно розроблений підхід може бути успішно застосований для інженерних розрахунків та розробки раціональних регламентів проведення процесу пресування вуглецевих виробів.



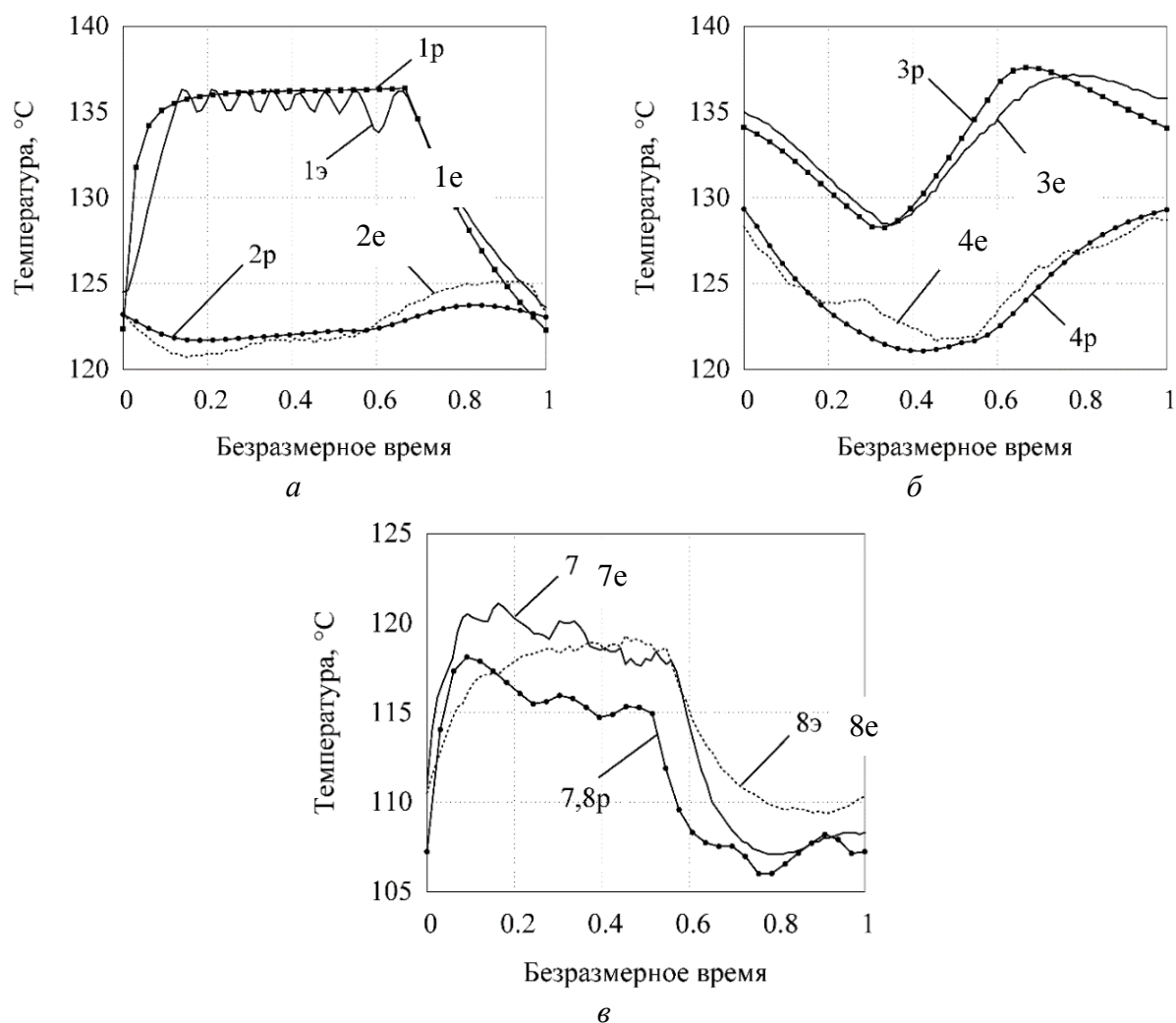


Рис. 4.4. Зіставлення експериментальних і розрахункових даних зі зміни температури в контрольних точках на протязі кампанії пресування: т. 1–8 – контрольні точки вимірювання температури; *e* – експериментально виміряні значення температури; *p* – значення температури, отримані в результаті числового моделювання

### 4.3. Результати числового моделювання

З використанням розробленого програмно-методичного комплексу для дослідження теплогідродинамічного стану пресового інструменту під час екструзії крізь мундштук вуглепеккових заготовок проведено числовий аналіз фізичних полів промислового обладнання для розробки енергозберігаючих технологічних регламентів, що забезпечують вихід безбракової продукції. На рис. 4.5 наведено поле розподілу швидкості в поздовжньому перерізі пресованої заготовки, де нерівномірність швидкості присутня лише в зоні пластичної деформації у вхідній частини мундштука, а в калібрувальній частині спостерігається рух маси з постійною швидкістю по перерізу, що відповідає структурному режиму течії в'язко-пластичної рідини.

Розрахункова похибка моделювання теплогідродинамічної задачі процесу пресування за довірчої ймовірності  $W=0,68$  становить не більше 10 %. Для зручності пошуку раціональних температурних умов пресування результати наведено за триколірною шкалою на рис. 4.8–4.15, на якій червоний – вище

150 °С, жовтий – 110–150 °С і синій – нижче 110 °С. Мінімальний необхідний діаметр твердого ядра маси з температурою 95–110 °С позначений лінією кола.

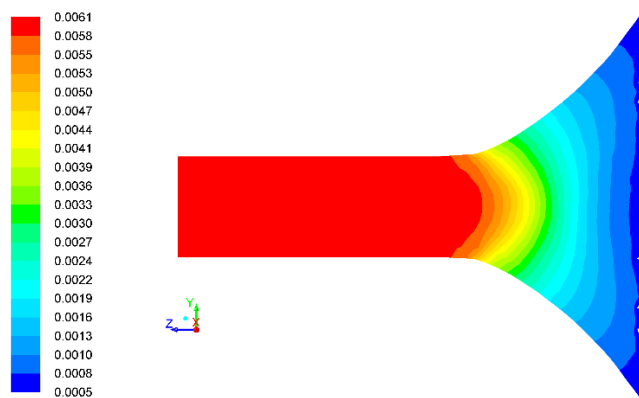


Рис. 4.5. Результати розрахунків розподілу швидкості по перерізу пресованої маси в мундштуку

Термограми мундштука та пресованої маси в початковий момент часу і на кінець процесу пресування наведено на рис. 4.6, 4.7.

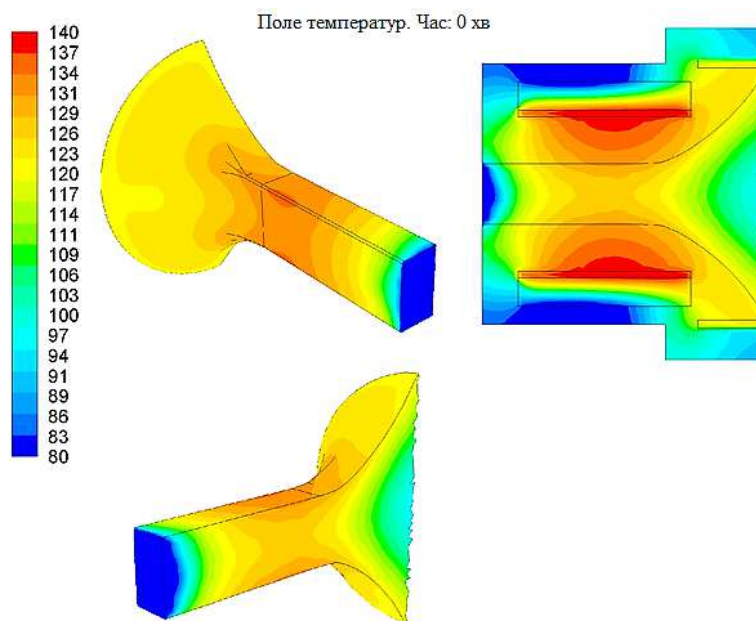


Рис. 4.6. Термограма поздовжнього перерізу пресового інструменту та пресованої маси перед початком процесу пресування

Рис. 4.8–4.15 ілюструють рух матеріалу з різними ділянками температури. Після 20 хв пресування з'являється усталеність в температурному режимі пресування. Видно, що від початку пресування за 20 хв видаляється весь матеріал з попередньої операції пресування (розпар). Слід звернути увагу, що на 15 хв у перерізі на вході в калібрувальну частину зона з температурою нижче 110 °С перебуває в межах допустимої товщини прогріву матеріалу, тобто в цій зоні починається процес отримання бездефектної продукції. На наступних часових ділянках пресування матеріал має необхідне ядро матеріалу (з

температурою меншою за 110 °С), що розташовані поза межами, позначених на графіках лінією кола в поперечному перерізі й поздовжніх ліній по осі мундштука.

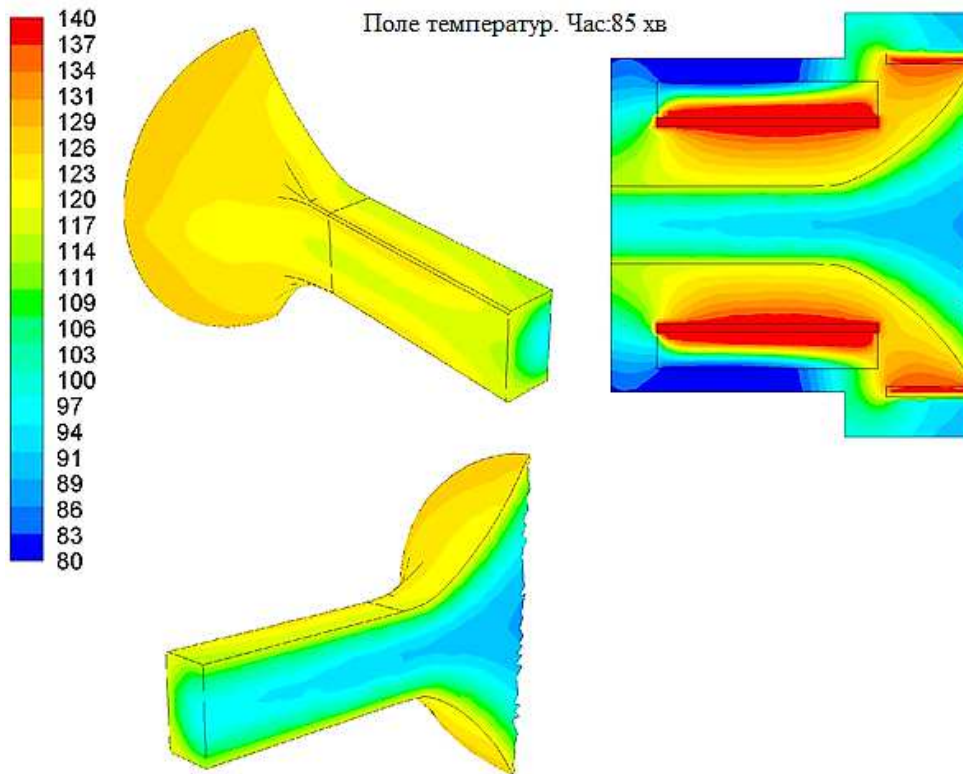


Рис. 4.7. Термограма поздовжнього перерізу пресового інструменту та пресованої маси в середині процесу пресування

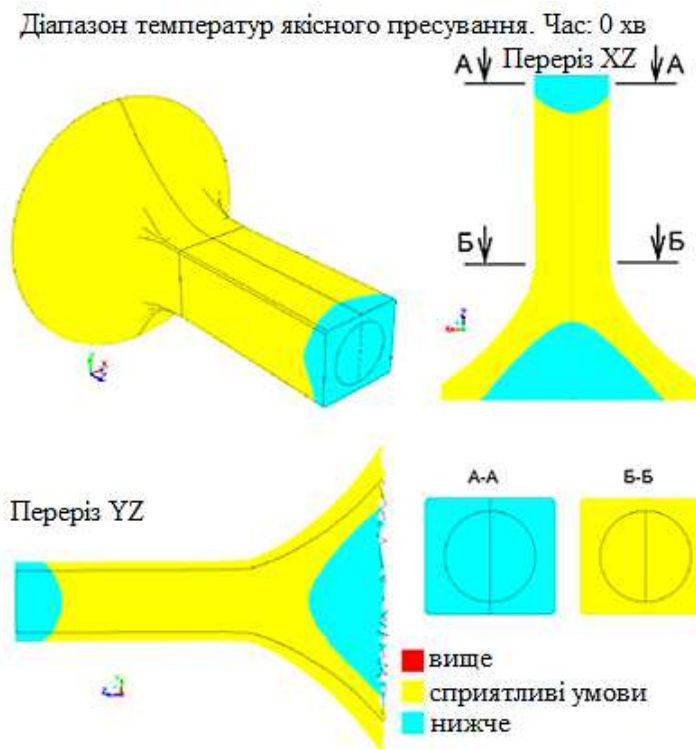


Рис. 4.8. Температурний режим пресування в початковий момент часу

Діапазон температур якісного пресування. Час: 5 хв

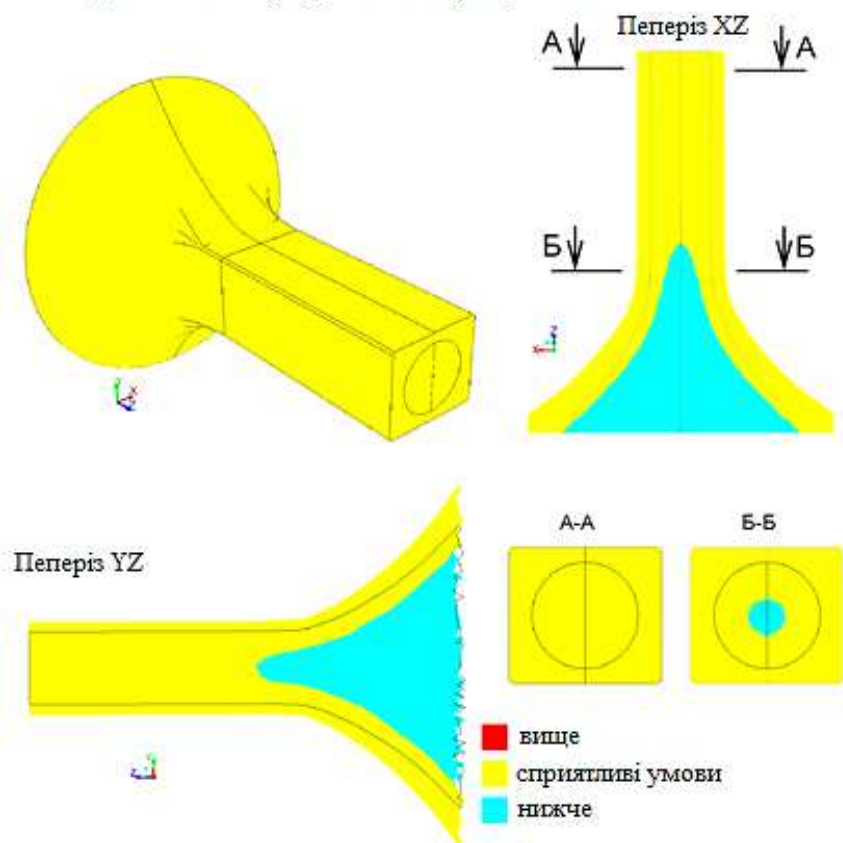


Рис. 4.9. Температурний режим пресування в момент часу 5 хв

Діапазон температур якісного пресування. Час: 10 хв

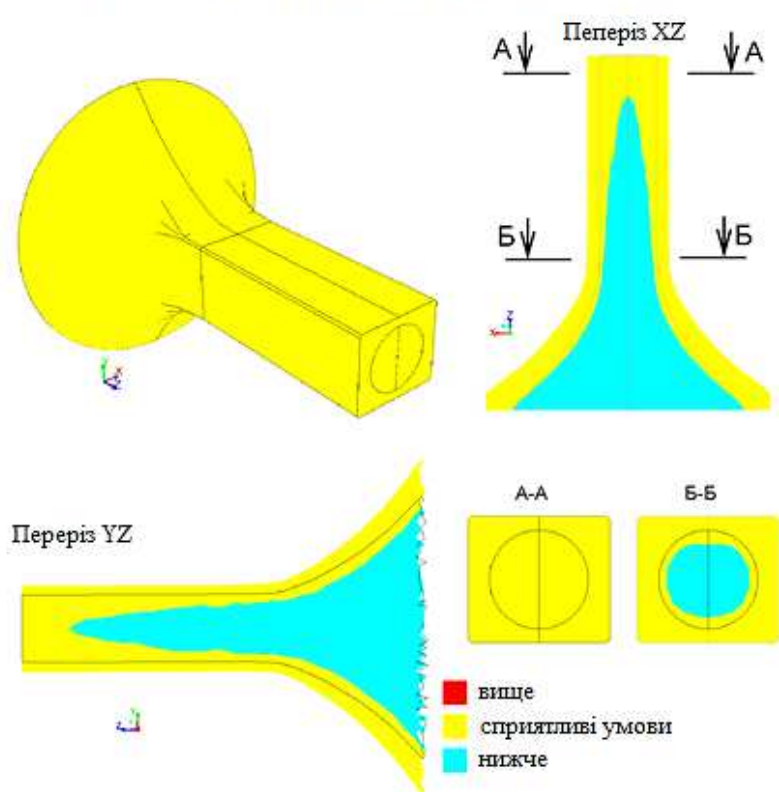


Рис. 4.10. Температурний режим пресування в момент часу 10 хв

Діапазон температур якісного пресування. Час: 15хв

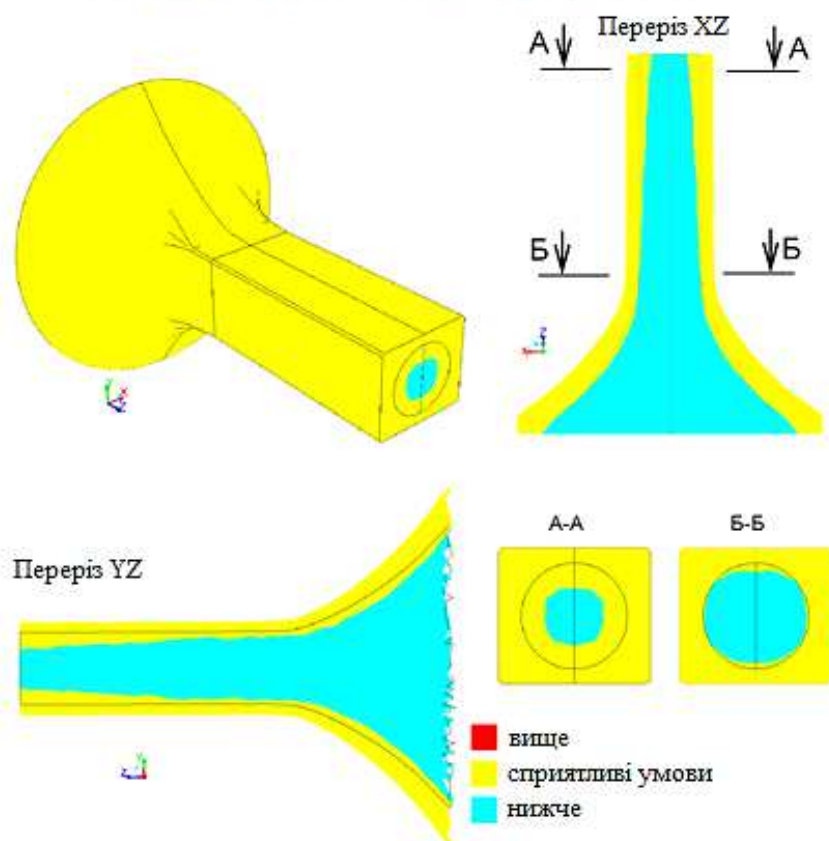


Рис. 4.11. Температурний режим пресування в момент часу 15 хв

Діапазон температур якісного пресування. Час: 20 хв

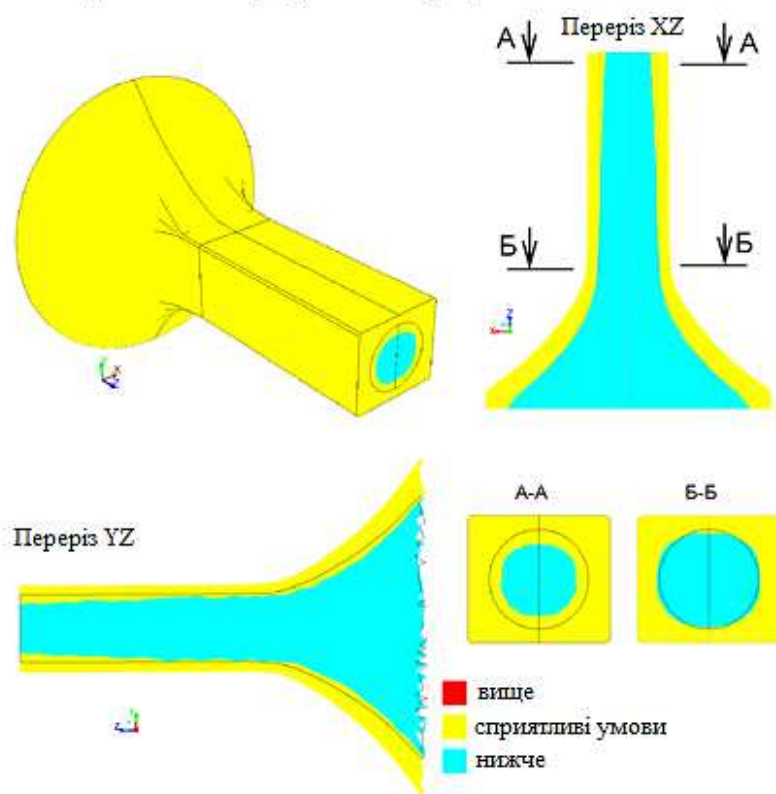


Рис. 4.12. Температурний режим пресування в момент часу 20 хв



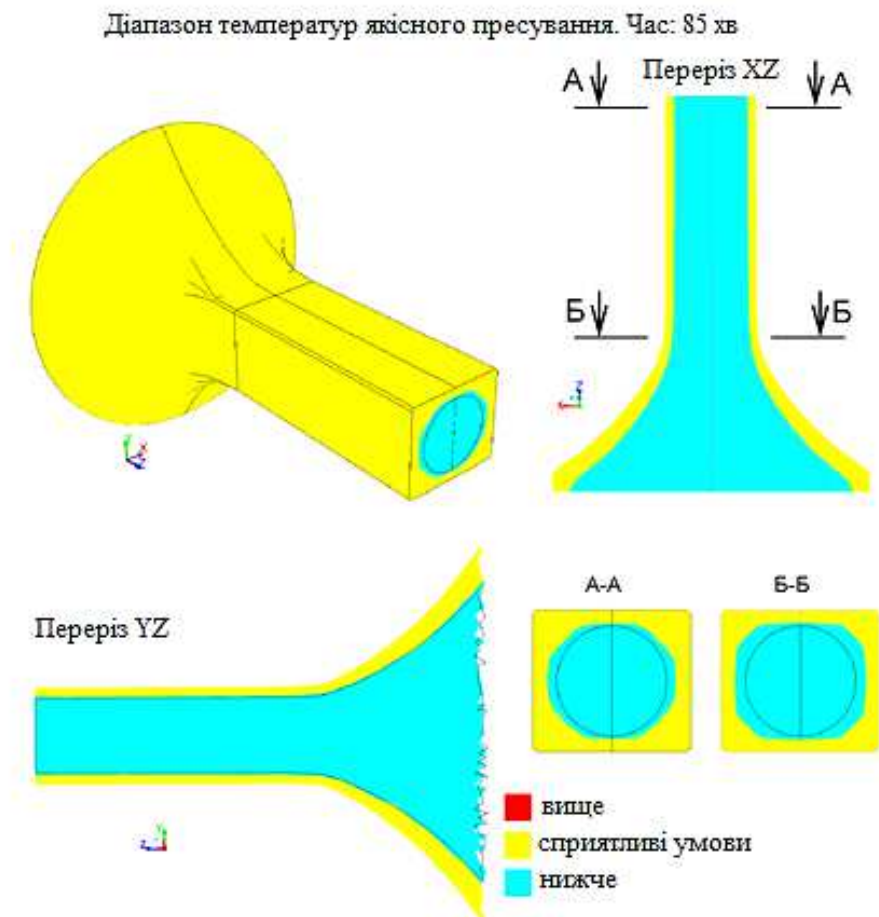


Рис. 4.13. Температурний режим пресування в момент часу 85 хв

Також розглянуто варіанти числового моделювання теплового стану мундштука за умови включених і виключених свічках підігріву (рис. 4.14, 4.15).

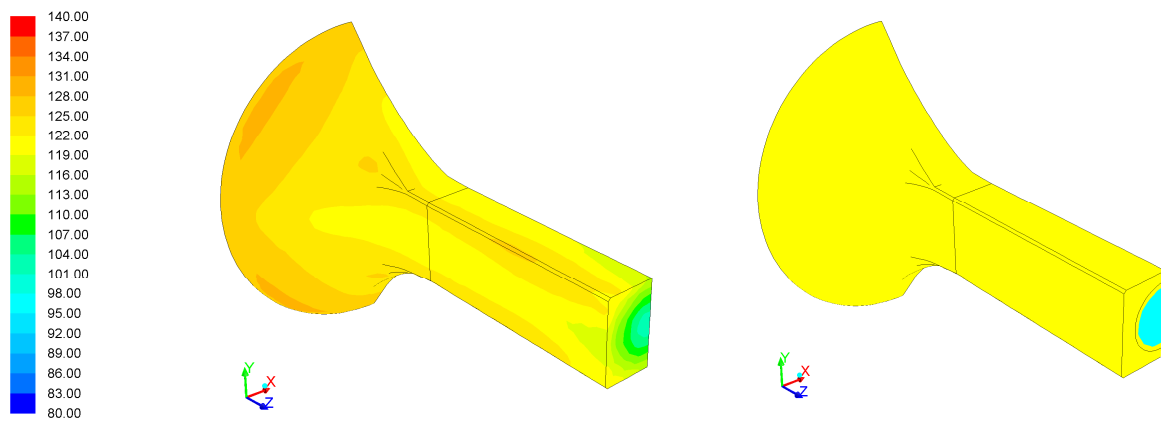


Рис. 4.14. Термограма пресованої маси з включеними свічками (в кінці пресування 85 хв)

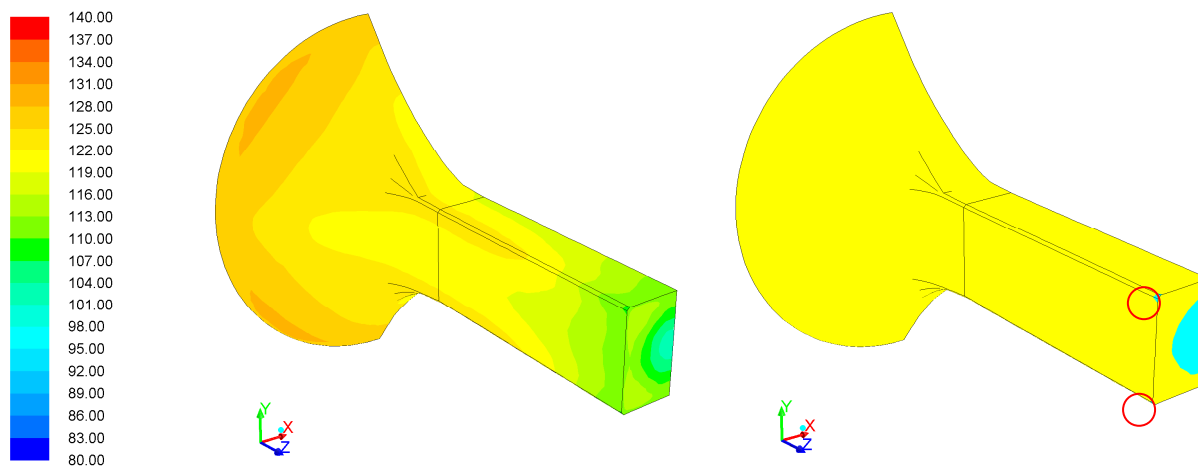


Рис. 4.15. Термограма пресованої маси з вимкненими свічками (в кінці пресування 85 хв)

З термограм видно, що під час роботи пресового інструменту з відключеними свічками підігріву, пресований матеріал характеризується більш низькою температурою в кутах порівняно з іншою частиною його зовнішньої поверхні. Таке явище пов'язане з більш розвиненою поверхнею теплообміну заготовок прямокутного перерізу й може призводити до прилипання маси до поверхні мундштука.

#### 4.4. Вплив зміни технологічних параметрів на показники режиму пресування

Згідно з діючими на електродних заводах технологічними інструкціями контрольованими параметрами є температурний режим і тиск пресування. Практика пресування показала, що контролю за тиском пресування недостатньо, необхідний додатковий контроль за швидкістю пресування. З технологічного боку найбільш повно характеризує процес отримання заготовок інтенсивність видавлювання, оскільки враховує спільний вплив температурно-швидкісних і силових умов деформації [53].

Таким чином, важливими технологічними параметрами пресування вуглеграфітових заготовок є температура й швидкість (визначається прикладеним тиском). При цьому треба зазначити, що зміна швидкості пресування якісно не змінює розподіл швидкості по перерізу пресованої маси (див. рис. 4.5) з причини низького рівня швидкостей, які супроводжуються структурним плином маси.

Процес пресування безбракової продукції визначається температурою маси, що завантажується в масний циліндр і швидкістю її пресування.

Для існуючого в умовах реального виробництва рівня швидкості руху матеріалу крізь мундштук коксопекова маса поводить як структурована в'язко-пластична рідина, що характеризується наявністю уздовж стінок внутрішньої поверхні мундштука суцільного тонкого ламінарного шару рідини

й псевдотвердого тіла в основному потоці. У цьому разі визначальну роль у нерозривності середовища відіграє наявність вище зазначеного тонкого ламінарного шару, який забезпечує умови проковзування основного потоку по внутрішній поверхні мундштука. З фізичної точки зору роль мастила на поверхні контакту виконує кам'яновугільний пек, який під дією тиску та нагрівання вище температури розм'якшення дифундує на периферію потоку матеріалу [57].

Температурний діапазон, що забезпечує необхідні умови проковзування для вуглецевого композиту становить 110–150 °С. З іншого боку, необхідною умовою структурного режиму течії є наявність твердого та пластичного ядра потоку, що є можливим за температур вуглецевої маси нижче 110 °С [58].

Дані експериментальних досліджень та результати числового моделювання дають змогу визначити характеристики температурного поля вихідної частини мундштука, необхідного для одержання бездефектних виробів.

Характеристична величина  $A$  є співвідношенням площі поверхні маси, яка має температури нижче ніж 110 °С до загальної площі перерізу вихідної частини мундштука

$$A = \frac{S_{110^{\circ}\text{C}}}{S}, \quad (4.1)$$

де  $S_{110^{\circ}\text{C}}$  – площа поверхні перерізу мундштука, що має температуру нижче за 110 °С, м<sup>2</sup>;  $S$  – загальна площа перерізу мундштука, м<sup>2</sup>.

Зазначена величина розраховується для початкової ( $A_1$ ) і кінцевої ( $A_2$ ) ділянок калібрувальної частини мундштука і має перебувати в діапазоні 0,2–0,55 під час процесу формування. Саме такі умови характеризують достатній поверхневий шар матеріалу з температурою 110–150 °С та наявне ядро потоку з температурою нижче від 110 °С.

Методи числового аналізу дають змогу виконати оцінку впливу на тепловий стан та показники процесу формування вуглецевих заготовок таких основних параметрів:

- швидкість пресування ( $v$ );
- потужність нагрівника масного циліндра ( $Q_{\text{масн. цил.}}$ );
- потужність нагрівника західної частини мундштука ( $Q_{\text{зах.}}$ );
- потужність нагрівника калібрувальної частини мундштука ( $Q_{\text{калібр.}}$ );
- температура маси, що завантажується ( $T_{\text{мас.}}$ );

Проведена серія числових розрахунків з варіюванням окремих параметрів за незмінного значення всіх інших величин та режиму роботи пресового інструменту. Значення використаних для числових досліджень параметрів наведено в табл. 4.1. Їх вплив на перебіг процесу формування заготовок оцінено за зміною величин  $A_1$  та  $A_2$  (рис. 4.16–4.20) порівняно з базовою (експериментальною) (крива 2) кампанією на періоді пресування.



Таблиця 4.1. Параметри числових досліджень процесу формування вуглецевих виробів

Параметр	Значення параметрів для базового варіанту	Варіаційне значення параметрів	
Швидкість пресування заготовок, м/хв	0,68	0,34	0,95
Потужність нагрівника масного циліндра, кВт	22	20	24
Потужність нагрівника західної частини мундштука, кВт	33	30,6	35,4
Потужність нагрівника калібрувальної частини мундштука, кВт	46	40,6	51,4
Температура маси, що завантажується, °С	97	90	

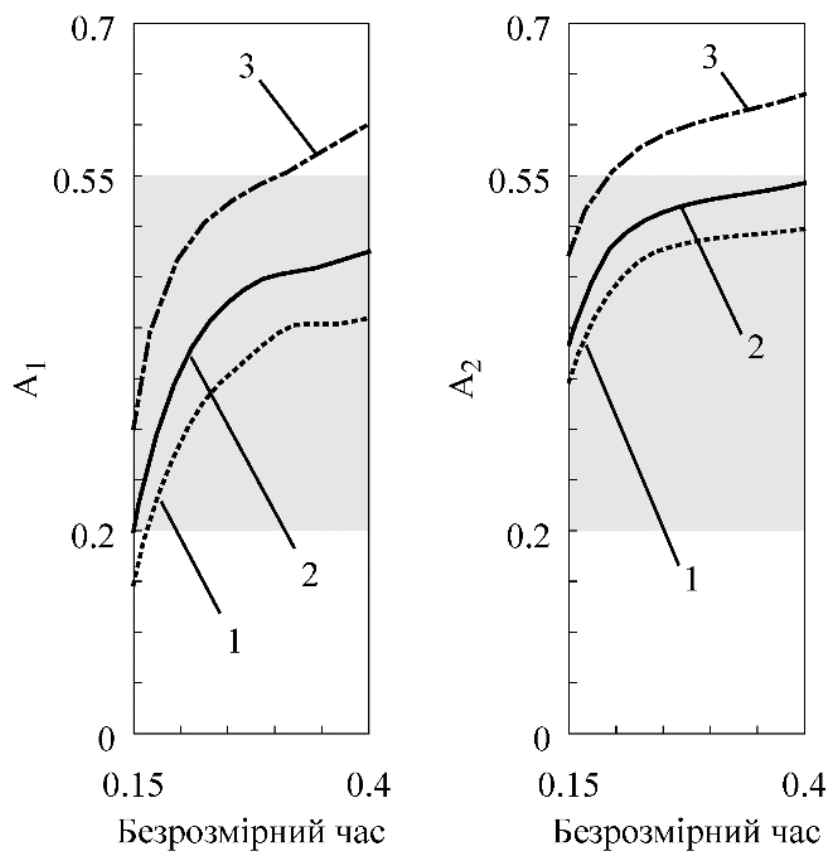


Рис. 4.16. Вплив на  $A_1$  та  $A_2$  зміни швидкості пресування заготовок:  
 а -  $A_1$ ; б -  $A_2$ ; 1 -  $v = 0,34$  м/хв; 2 -  $v = 0,68$  м/хв; 3 -  $v = 0,95$  м/хв

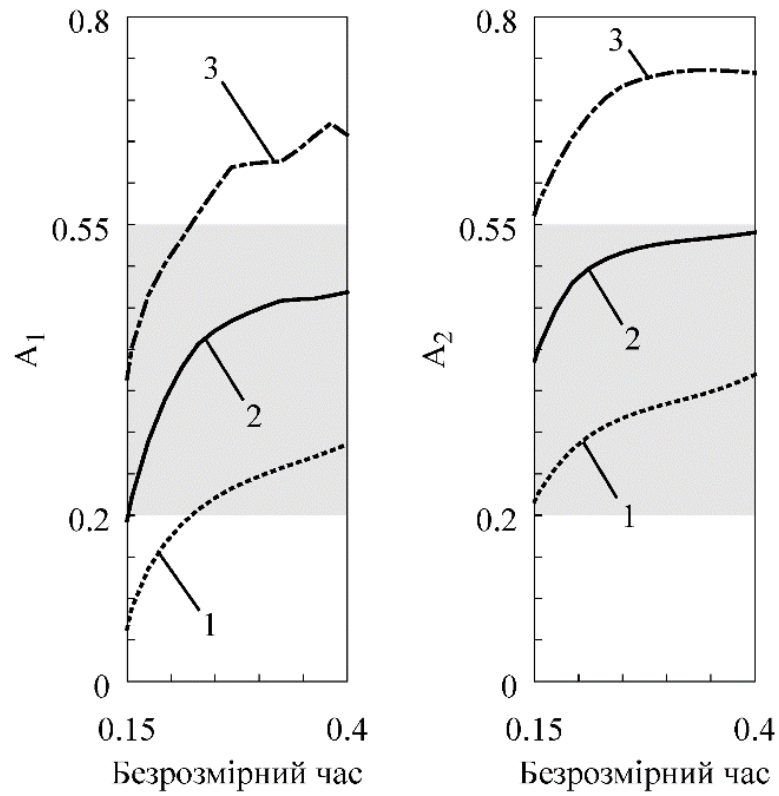


Рис. 4.17. Вплив на  $A_1$  та  $A_2$  зміни потужності нагрівника масного циліндра:  
 $a - A_1$ ;  $б - A_2$ ; 1 –  $Q_{\text{масн. цил.}} = 20 \text{ кВт}$ ; 2 –  $Q_{\text{масн. цил.}} = 22 \text{ кВт}$ ; 3 –  $Q_{\text{масн. цил.}} = 24 \text{ кВт}$

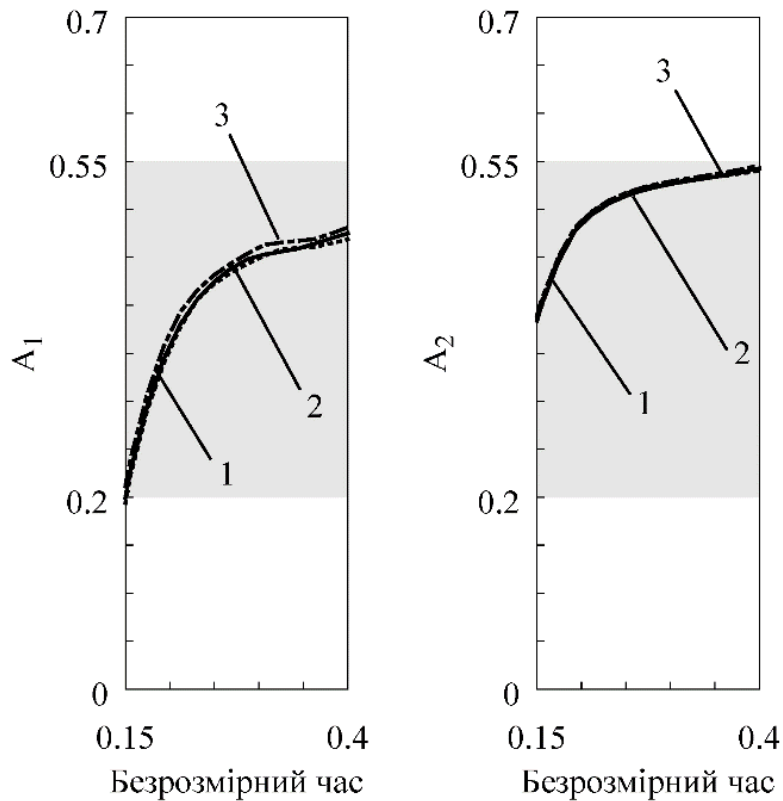


Рис. 4.18. Вплив на  $A_1$  та  $A_2$  зміни потужності нагрівника західної частини мундштука:  
 $a - A_1$ ;  $б - A_2$ ; 1 –  $Q_{\text{зах.}} = 30,6 \text{ кВт}$ ; 2 –  $Q_{\text{зах.}} = 33 \text{ кВт}$ ; 3 –  $Q_{\text{зах.}} = 35,4 \text{ кВт}$

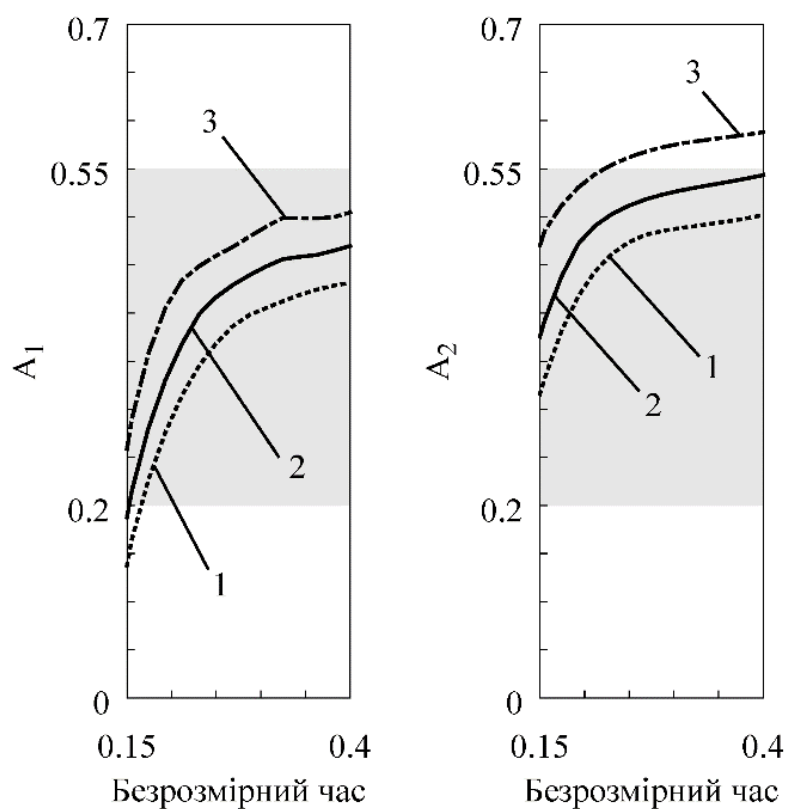


Рис. 4.19. Вплив на  $A_1$  та  $A_2$  зміни потужності нагрівника калібрувальної частини мундштука:

$a - A_1$ ;  $b - A_2$ ; 1 –  $Q_{\text{калібр.}} = 40,6 \text{ кВт}$ ;  
 2 –  $Q_{\text{калібр.}} = 46 \text{ кВт}$ ; 3 –  $Q_{\text{калібр.}} = 51,4 \text{ кВт}$

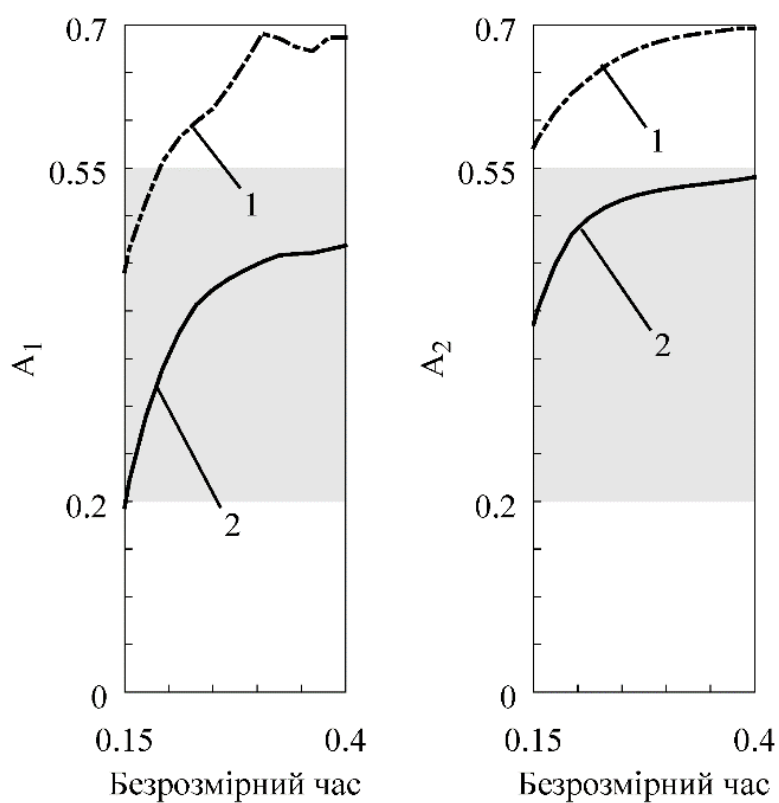


Рис. 4.20. Вплив на  $A_1$  та  $A_2$  зміни температури маси, що завантажується:

$a - A_1$ ;  $b - A_2$ ; 1 –  $T_{\text{мас.}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T_{\text{мас.}} = 97 \text{ }^\circ\text{C}$

## **4.5. Аналіз отриманих результатів**

Найбільш суттєво на температурне поле пресованої вуглецевої маси впливає зміна швидкості пресування, потужності нагрівника масного циліндра та температури маси, що завантажується. Дещо менший вплив має нагрівник калібрувальної частини мундштука, а нагрівник західної частини мундштука практично не змінює температурне поле на виході із пресового інструменту.

Представлені результати числового експерименту вказують на можливість значно впливати на показники процесу пресування, зміною майже всіх розглянутих параметрів. Проте наведені варіаційні значення параметрів призводять до зміни показників процесу, що виходять за допустимий діапазон, характерний для безбракової кампанії пресування. Результати підтверджують раціональність регламенту формування розглядуваних вуглецевих виробів, який застосовується на виробництві.

Отримані дані дають змогу прогнозувати та змінювати процес формування великогабаритних вуглецевих заготовок, при зміні характеристик пресмаси чи інших технічних умов.

## **4.6. Висновки до розділу 4**

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) Проведена верифікація розробленої числової моделі теплогідродинамічного стану мундштука під час пресування за даними експериментальних досліджень показала, що різниця між розрахунковими даними та експериментальними значеннями температур пресового інструменту не перевищують 10 %, що дає змогу застосовувати розроблену модель для відпрацювання раціональних регламентів пресування електродної продукції.

2) Розроблена числова модель теплогідродинамічного стану пресового інструменту та методика проведення числових експериментів представляє собою програмно-методичний комплекс, який дає змогу досліджувати та розробляти раціональні регламенти екструзії електродних заготовок крізь мундштук з метою зменшення виходу бракованих виробів, що призводить до мінімізації витрат енергетичних та матеріальних ресурсів.

3) Досліджено вплив визначальних технологічних параметрів на показники режиму пресування електродних заготовок (швидкість пресування, температура завантажувальної маси, потужність, температура індуктора та температура масного циліндра), що дало змогу побудувати залежності температур вуглепекової композиції у визначальних перерізах мундштука та масного циліндра в циклі екструзії пекококскових напівфабрикатів. За допомогою отриманих залежностей встановлено раціональні температурні режими пресування електродних заготовок.

4) На підставі проведених числових досліджень різних режимів пресування заготовок розроблено раціональний температурний регламент екструзії напівфабрикатів прямокутного перерізу, який базується на розрахованих раціональних температурних режимах пресування в поздовжньому й поперечному перерізах мундштука та на температурних

режимах, що отримано під час дослідження впливу визначальних параметрів процесу. Розроблений регламент дає змогу зменшити вихід бракованих виробів на 4–5 %.

5) Розроблений програмно-методичний комплекс для числового дослідження теплогідродинамічного стану пресового обладнання дає змогу безпосередньо на підприємстві розробляти регламенти екструзії електродних заготовок у стислий термін без виконання коштовних експериментальних досліджень, що є особливо важливим за умови переходу на виробництво нової продукції.

## **5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ БЕЗДЕФЕКТНИХ ЕЛЕКТРОДНИХ ЗАГОТОВОК**

Розробка методик і заходів з ресурсоенергозбереження із застосуванням раціональних регламентів пресування (температурні та швидкісні режими процесу пресування) вуглеграфітових виробів дає можливість досягти зменшення питомої витрати енергії (ПВЕ) за умови підвищення якості кінцевого продукту та зменшення виходу браку.

Проблема появи бракованої продукції полягає в нерівномірності розподілу швидкості по перерізу калібрувальної частини мундштука за рахунок прилипання вуглепекової маси до внутрішньої поверхні. Умови прилипання вуглепекової маси тісно зв'язані з температурою її розм'якшення. Різниця за швидкістю між центральною й периферичною частинами видавлюваної маси призводить до значних напружень, що супроводжуються появою тріщин. Використання периферійного нагрівання із заданим раціональним температурним полем по перерізу пресованої заготовки дає можливість забезпечити рівномірний розподіл швидкості маси по перерізу мундштука та відповідно зменшення ймовірності появи тріщин і виходу браку.

### **5.1. Спосіб визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів процесу екструзійного пресування електродних заготовок з вуглевмісної композиції**

У пропонованому способі, за якого задають умови однозначності процесу формування, аналізують процес формування, складають і розв'язують задачу та обчислюють значення цільової функції, після чого здійснюють її порівняння з потрібним значенням, змінюють вихідні дані й математичним розрахунком встановлюють раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів зазначеного процесу пресування, новим є те, що задачу складають у вигляді системи рівнянь Нав'є–Стокса за визначених умов однозначності та за умов розгляду пресованої вуглевмісної композиції як неньютонівської рідини, поведінка якої описується моделлю Bingham–Papanastasiou (див. розд. 2), а після порівняння обчисленого значення цільової функції з потрібним значенням, змінюють не лише вихідні умови, а й та/або початкові та граничні умови [53].

Як показали проведені дослідження, електродна або коксопекова маса, що використовується для пресування електродних заготовок, за своєю сутністю є композиційним матеріалом, який складається з твердого вуглецевого наповнювача і кам'яновугільного або нафтового пеку [59] і яка має фізичні властивості неньютонівської рідини. Тому використання пропонованого способу із зазначеними суттєвими ознаками дає змогу ефективно й без значних затрат енергетичних, матеріальних і людських ресурсів визначити конструктивно-технологічні параметри процесу екструзійного пресування

електродних заготовок з вуглевмісної композиції, які забезпечують потрібні умови виходу високоякісної продукції.

Зокрема за умови розгляду пресованої вуглевмісної композиції як неньютонівської рідини, поведінка якої описується моделлю Bingham–Papanastasiou, була проведена верифікація розробленого способу за даними експериментальних досліджень, яка показала, що різниця між визначеними за допомогою пропонованого способу та експериментальними значеннями температур пресового інструменту не перевищують 4–10 %. Тобто спосіб дає змогу визначати раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів зазначеного процесу пресування для розробки ефективних регламентів експлуатації пресового інструменту в разі зміни складу вуглевмісної (зокрема коксопекової) суміші та/або типорозмірів виробів.

## 5.2. Модернізація пристрою для пресування електродних заготовок

Пропонований пристрій належить до обладнання перероблення твердого вуглевмісного матеріалу й може бути використаний у хімічній і металургійній галузях промисловості, зокрема для одержання високоякісних електродних виробів методом екструзійного пресування.

В основу розробки покладено завдання вдосконалити традиційний пристрій для пресування електродних заготовок, у якому забезпечується зручне зберігання набору калібрувальних втулок і швидка їх заміна в разі переходу на випуск електродних заготовок іншого типорозміру, що розширює технологічні можливості пристрою.

Пристрій для пресування електродних заготовок містить корпус 1 з циліндричною порожниною 2 для розміщення в ній електродної маси, розташованим у циліндричній порожнині 2 корпусу 1 пуансоном 3, а на виході з неї – мундштуком 4, а також набір послідовно розмічувальних на виході з мундштука 4 змінних калібрувальних втулок 5. При цьому змінні калібрувальні втулки 5 розміщено в гніздах 6 поворотної обойми 7 з можливістю послідовного суміщення між собою каналів мундштука 4 та кожної зі змінних калібрувальних втулок 5 (рис. 5.1) [60]

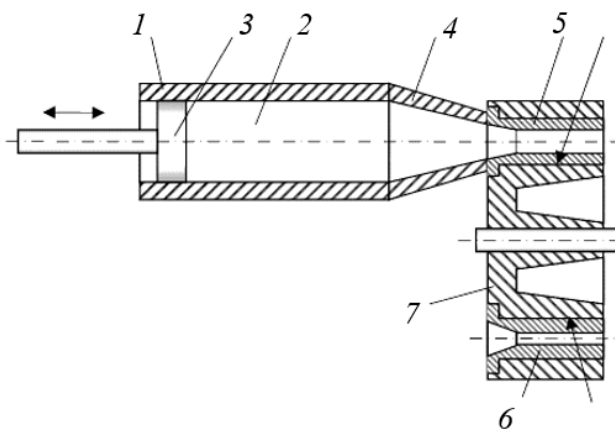


Рис. 5.1. Пристрій для пресування електродних заготовок (пояснення в тексті)

Пристрій працює в такий спосіб. Залежно від типорозміру електродних заготовок, що підлягають виготовленню, гніздо 6 поворотної обойми 7 з відповідно калібрувальною втулкою 5 суміщають з каналом мундштука 4, після чого здійснюють екструзування електродної маси та одержують потрібні електродні заготовки [59].

### **5.3. Висновки до розділу 5**

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1) Розроблено методики й заходи з ресурсо-енергозбереження із застосуванням раціональних регламентів (температурні та швидкісні режими процесу пресування) пресування вуглеграфітових виробів.

2) Вдосконалено традиційний пристрій для пресування електродних заготовок, у якому забезпечується зручне зберігання набору калібрувальних втулок і швидка їх заміна у разі переходу на випуск електродних заготовок іншого типорозміру.



## **6. РЕЗУЛЬТАТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З РЕСУРСО-ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕСУВАННЯ ЕЛЕКТРОДНОГО ВИРОБНИЦТВА**

### **6.1. Загальні відомості**

Отримані результати науково-технічних досліджень процесу формування вуглецевих заготовок були впроваджені на підприємстві ПрАТ «Укрграфіт» м. Запоріжжя.

Основним предметом впровадження є:

- математична й числова моделі теплогідродинамічного стану для числового аналізу фізичних полів пресового інструменту для формування композитної вуглевмісної маси;
- експериментальні дані з розподілу температурних полів в пресовому інструменті і масі, що формується на діючому обладнанні;
- експериментальні дані з показників роботи пресового інструменту;
- експериментальні дані з теплофізичних властивостей вуглепекових композицій;
- результати числового аналізу фізичних полів пресового інструменту з розроблення раціональних регламентів, які забезпечують вихід бездефектної продукції;
- розроблене програмно-методичне забезпечення (ПМЗ) для виконання числового аналізу теплогідродинамічного стану пресового інструменту при виготовленні вуглевмісної продукції шляхом екструзії крізь мундштук.

Зазначений науковий доробок дозволив значно розширити обсяг технічної інформації технологічного відділу формування ПрАТ «Укрграфіт». При цьому розроблене ПМЗ є корисним інструментом, що дає змогу технологам впроваджувати енергоефективні регламенти роботи пресового обладнання залежно від конкретних потреб виробництва. Окрім того, методами числового моделювання визначено параметри процесу, якими можна впливати на його перебіг та якісні показники, а також напрями інтенсифікації та модернізації загальної технології формування вуглепекових композитних матеріалів.

### **6.2. Висновки до розділу 6**

Запропоновані технічні рішення та результати науково-технічних досліджень впроваджені на електродному виробництві ПрАТ «Укрграфіт» на етапі формування вуглецевих виробів методом екструзії крізь мундштук.

## ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

Головним результатом проведених досліджень стало вирішення важливої науково-технічної задачі з розробки на базі вільного відкритого програмного коду OpenFOAM програмно-методичного забезпечення для виконання числового аналізу теплогазодинамічного стану пресового інструменту, що дає змогу розробляти раціональні регламенти екструзії електродних заготовок крізь мундштук з мінімізацією виходу бракованих виробів та енергетичних витрат виробництва.

1) На підставі літературного огляду стану питання експериментального дослідження і математичного моделювання процесу та обладнання для екструзії електродних вуглеграфітових заготовок обґрунтовано доцільність використання ідеальної рідини Bingham, яка є неньютонівською в'язко-пластичною нестисливою рідиною.

2) Сформульовано фізичну модель поведінки коксопекової суміші під час процесу виготовлення «зелених» вуглеграфітових заготовок способом екструзії. Виконано обґрунтування застосування моделі рідини Bingham–Papanastasiou для описання теплогідродинамічного стану пресового інструменту під час екструзії електродних заготовок з коксопекової суміші.

3) Експериментально досліджено динамічну в'язкість коксопекової суміші та зсувні напруження під час її руху крізь мундштук на границі маса – поверхня мундштука. Виконано термоаудит пресового інструменту під час екструзії електродних заготовок (блоків) у промислових умовах. Отримані експериментальні дані необхідні для проведення числового аналізу теплогідродинамічного стану пресового інструменту для задання теплофізичних властивостей, початкових та граничних умов. Експериментальні дані з термоаудиту пресового інструменту також потрібні для верифікації її математичної моделі його теплогідродинамічного стану прес інструменту.

4) Описано числову методику розв'язання задачі теплогідродинамічного стану пресового інструменту, що базується на числовому методі скінченних елементів з використанням pressure-based solver та алгоритму SIMPLE.

5) На підставі математичної моделі розроблено числову модель теплогідродинамічного стану пресового інструменту під час екструзії електродних заготовок з використанням вільного відкритого програмного коду OpenFOAM.

6) Проведено верифікацію розробленої числової моделі теплогідродинамічного стану мундштука під час пресування за даними експериментальних досліджень, яка показала, що різниця між розрахунковими даними та експериментальними значеннями температур пресового інструменту не перевищують 10 %, що дає змогу застосовувати розроблену модель для відпрацювання раціональних регламентів пресування електродної продукції.

7) Розроблена числова модель теплогідродинамічного стану пресового інструменту разом з методикою проведення числових експериментів представляє собою програмно-методичний комплекс, який дає змогу досліджувати та розробляти раціональні регламенти екструзії електродних

заготовок крізь мундштук з метою зменшення виходу бракованих виробів, що призводить до мінімізації витрат енергетичних і матеріальних ресурсів.

8) Досліджено вплив визначальних технологічних параметрів на показники режиму пресування електродних заготовок (швидкість пресування, температура завантажувальної маси, потужність, температура індуктора та температура масного циліндра), що дало змогу побудувати залежності температур вуглепекової композиції у визначальних перерізах мундштука та масного циліндра в циклі екструзії пекококсівих напівфабрикатів. За допомогою отриманих залежностей встановлено раціональні температурні режими пресування електродних заготовок, що позначені сірими зонами на відповідних графіках.

9) На підставі проведених числових досліджень різних режимів пресування заготовок розроблено раціональний температурний регламент екструзії напівфабрикатів прямокутного перерізу, який базується на розрахованих раціональних температурних режимах пресування в поздовжньому й поперечному перерізах мундштука та на температурних режимах, що отримано під час дослідження впливу визначальних параметрів процесу. Розроблений регламент дає змогу зменшити вихід бракованих виробів на 4–5 %.

10) Розроблений програмно-методичний комплекс для числового дослідження теплогідродинамічного стану пресового обладнання дає змогу безпосередньо на підприємстві розробляти регламенти екструзії електродних заготовок в короткий термін без виконання коштовних експериментальних досліджень, що є особливо важливим за умови переходу на виробництво нової продукції.

11) Розроблено методики та заходи з ресурсоенергозбереження із застосуванням раціональних регламентів (температурні та швидкісні режими процесу пресування) пресування вуглеграфітових виробів.

12) Вдосконалено традиційний пристрій для пресування електродних заготовок, у якому забезпечується зручне зберігання набору калібрувальних втулок і швидка їх заміна у разі переходу на випуск електродних заготовок іншого типорозміру.

13) Результати проведених досліджень опубліковано в працях [42, 56, 58–90].

На підставі проведених досліджень можна надати такі рекомендації:

1) Використання розроблених методик не обмежується можливістю їх застосування для виконання теплогідродинамічних розрахунків під час екструзії електродних заготовок. Завдяки своїй універсальності, дані розробки можуть бути використані під час числового аналізу теплогідродинамічного стану різноманітного обладнання для екструзії полімерів.

2) З використанням числових експериментів при зміні конструкцій та вхідних параметрів потоку можна визначати раціональні технічні рішення під час розробки нового обладнання або модернізації діючого.

3) Доцільно продовжити започатковані роботи в напрямку виконання досліджень поведінки неньютонівських рідин із застосуванням фізичних

експериментів та методів числового моделювання для розв'язання таких науково-технічних задач:

- експериментальне визначення температурних параметрів діючого пресового обладнання з використанням інтелектуальних датчиків;
- визначення теплогідродинамічного стану екструзійного обладнання з використанням методів дискретного елемента й молекулярної динаміки.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. *Производство* электродной продукции / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др. Москва : Металлургия, 1985. 129 с.
2. *Чалых Е. Ф.* Оборудование электродных заводов. Москва : Металлургия, 1990. 235 с.
3. *Металлургический портал:* информационное пространство металлургов. URL: <http://www.metalspace.ru> (дата доступа: 13.03.2020).
4. *Фиалков А. С.* Формирование структуры и свойств углеродистых материалов. Москва : Металлургия, 1965. 288 с.
5. *Ключников В. В., Устинов Ю. В.* Производство углеродистых материалов. Москва : НИИГрафит, 1982. С. 43–49.
6. *Андерсон Д., Тинненхилл Дж., Плетчер Р.* Вычислительная гидродинамика и теплообмен: в 2-х т. / пер. с англ. под ред. С. В. Сенина, Е. Ю. Шельмана. Москва : Мир. Т. 1. 1990. 384 с. Т. 2. 1990. 392 с.
7. *Самарский А. А., Моисеенко В. Д.* Экономическая схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журнал выч. математики и мат. физики. 1965. Т. 5, № 3. С. 816–827.
8. *Самарский А. А.* Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 614 с.
9. *Самарский А. А., Попов Ю. П.* Разностные методы решения задач газовой динамики. Москва : Наука, 1980. 352 с.
10. *Марчук Г. И.* Методы вычислительной математики : учебн. пособие. Москва : Наука, 1989. 608 с.
11. *Справочник* по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. Москва : Наука, 1984. 831 с.
12. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / пер. с англ. В. Д. Виленского. Москва : Энергоатомиздат, 1984. 153 с.
13. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике / пер. с англ.; под ред. Б. Е. Победри. Москва : Мир, 1975. 541 с.
14. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов / пер. с англ. А. А. Шестакова; под ред. Б. Е. Победри. Москва : Мир, 1979. 392 с.
15. *Норри Д., Фриз де Ж.* Введение в метод конечных элементов / пер. с англ. Г. В. Демидова, А. Л. Урванцева; под ред. Г. И. Марчука. Москва : Мир, 1981. 304 с.
16. *Spalding D. B.* Extending the frontiers of computational heat transfer // СНТ'08: International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, (Marrakech, 11–16 May, 2008) : abstracts. Marrakech; New York; Wallingford (UK), 2008. Р. 11.
17. *Бреббия К., Телес Ж., Вроубел Л.* Методы граничных элементов / пер. с англ. Л. Г. Корнейчука; под ред. Э. И. Григолюка. Москва : Мир, 1987. 524 с.
18. *Бенерджи П., Баттерфилд Р.* Методы граничных элементов в прикладных науках / пер. с англ. А. Ф. Зазовского и др.; под ред. Р. В. Гольдштейна. Москва : Мир, 1984. 494 с.

19. *Boundary Element Methods in Heat Transfer* / ed. L. C. Wrobel, C. A. Brebbia. London, New York: CMP Southampton Boston & Elsevier Applied Science, 1992. 294 p.
20. *Купрадзе В. Д.* Методы потенциала в теории упругости. Москва : Физматгиз, 1963. 472 с.
21. *The OpenFOAM Foundation*. . URL: <http://www.openfoam.org> (дата доступу: 13.03.2020).
22. *SALOME Platform*. URL: <http://www.salome-platform.org/> (дата доступу: 13.03.2020).
23. *Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities*. URL: <http://geuz.org/gmsh/> (дата доступу: 13.03.2020).
24. *Paraview*. URL: <http://www.paraview.org/> (дата доступу: 13.03.2020).
25. *Lee Sang-Min, Kang Dong-Su, Roh Jea-Seung*. Bulk graphite: materials and manufacturing process // *Carbon Letters*. 2015. Vol. 16, N 3. P. 135–146, doi: 10.5714/CL.2015.16.3.135.
26. *Фалков А. С.* Процессы и аппараты производства порошковых углеграфитовых материалов. Москва : Аспект Пресс, 2008. 687 с.
27. *Vershinina E. P., Gil'debrandt E. M., Frizorger V. K.* Plastic properties of homogenized coke-pitch compositions // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2011. Vol. 52, Issue 3. P. 205–208. doi: 10.3103/S1067821211030230.
28. *Rheological behavior and thermal properties of pitch/poly vinyl chloride blends* / S. R. Hlatshwayo, W. W. Focke, S. Ramjee et al. / *Carbon*. 2013. Vol. 51. P. 64–71. doi: 10.1016/j.carbon.2012.08.012.
29. *Mitsoulis E.* Flows of Viscoplastic Materials: Models and Computations // *Rheology Reviews* 2007. 2007. P. 135–178.
30. *Huilgol R. R., Mena B., Piau J. M.* Finite stopping time problems and rheometry of Bingham fluids // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 2002. Vol. 102. P. 97–107. doi: 10.1016/S0377-0257(01)00166-5.
31. *Cessation of Couette and Poiseuille flows of a Bingham plastic and finite stopping time* / M. Chatzimina, G. C. Georgiou, I. Argyropaidas et al. // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 2005. Vol. 129. P. 117–127. doi: 10.1016/j.jnnfm.2005.07.001.
32. *Papanastasiou T. C.* Flow of materials with yield // *J. Rheology*. 1987. Vol. 31. P. 385–404. doi: 10.1122/1.549926.
33. *Mathematical Model of Solid-Fuel Gasification in a Fluidized Bed* / E. N. Panov, A. Ya. Karvatskii, T. B. Shilovich et al. // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2014. Vol. 50, N. 5–6. P. 312–322. doi: 10.1007/s10556-014-9900-3.
34. *Математичне моделювання складного теплообміну повітряних регенераторів* / Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, І. Л. Шилович та ін. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 103 с.
35. *Математичне моделювання та експериментальні дослідження складного теплообміну при рості кристалів*. / В. І. Дешко, А. Я. Карвацький, Ю. В. Лохманець та ін.. // Серія: «Стан та перспективи розвитку функціональних матеріалів для науки і техніки» / під ред. Б. В. Гриньова. Харків : НАНУ Інститут сцинтиляційних матеріалів, 2012. 248 с.

36. *Калиткин Н. Н.* Численные методы : учеб. пособие / под ред. А. А. Самарского. Москва : Наука, 1978. 512 с.
37. *Rhie C. M., Chow W. L.* A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation // *AIAA Journal*. 1983. Vol. 21. P. 1525–1532.
38. *Holmes D. G., Connell S. D.* Solution of the 2D Navier-Stokes equations on *unstructured* adaptive grids // *AIAA 9th Computational Fluid Dynamics Conference*, 1989. : AIAA Paper. P. 83–169.
39. *Rauch R. D., Batira J. T., Yang N. T.* Spatial adaption procedures on unstructured meshes for *accurate* unsteady aerodynamic flow computations // Technical Report AIAA-91-1106, 1991 172 p.
40. *Ferziger J. H., Peric M.* Computational methods for fluid dynamics. 3rd ed.. New York : Springer, 2001. 423 p.
41. *Vandoormaal J. P., Raithby G. D.* Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows // *Numer. Heat Transfer*. 1984. N 7. P. 147–163.
42. *Математическая модель процесса экструзии вязко-пластичной углеродной массы* / Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: «Новые решения в современных технологиях». 2016. № 12 (1184). С. 31–37. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05.
43. *Kravtsova E. D., Gil'debrandt E. M., Frizorger V. K.* Plastic properties of pitch-coke compositions // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2009. № 50 (2). P. 114–117. <http://doi.org/10.3103/S1067821209020072>.
44. *The Viscosity of Pitches and Coke Pitch Compositions* / E. M. Gildebrandt, V. K. Frizorger, E. P. Vershinina, E. D. Kravtsova // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2008. Vol. 49, Issue 6. P. 456–458. doi:10.3103/S1067821208060047.
45. *Bhatia G.* Rheological properties of carbon mixes using a capillary rheometer // *Carbon*. 1973. Vol. 11, Issue 5. P. 437–440. doi:10.1016/0008-6223(73)90301-1.
46. *Bhatia G.* Rheological properties of carbon mixes using a capillary rheometer—IV / G. Bhatia // *Carbon*. 1976. Vol. 14, Issue 6. P. 319–321. doi:10.1016/0008-6223(76)90003-8.
47. Шуваев Э. А., Дмитриев Г. В. О коэффициенте внутреннего трения электродных масс в процессе обжига // *Сборник трудов челябинского электрометаллургического комбината*. 1971. № 3. С. 195–199.
48. *Чалых Е. Ф.* Технология углеграфитовых материалов. Москва : Металлургия, 1963. 304 с.
49. *Теоретические и экспериментальные исследования теплоэлектрического и механического состояния высокотемпературных агрегатов* / А. Я. Карвацкий, Е. Н. Панов, С. В. Кутузов и др. Киев : НТУУ «КПИ», 2012. 358 с.
50. *Dickinson J. M., Shore J. W.* Observations concerning the determination of porosities in graphites // *Carbon*. 1968. Vol. 6, Issue 6. P. 937–941. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-6223\(68\)90077-8](http://dx.doi.org/10.1016/0008-6223(68)90077-8).

51. *Bhatia G.* Physical characteristics of extruded carbon mixes // *Journal of Materials Science.* 1976. N 11(7). P. 1375–1377. doi: <http://doi.org/10.1007/BF00545165>.

52. *Уразлина О. Ю., Гасик М. М., Гасик М. И.* Исследование физических свойств термоантрацита при высокотемпературной прокатке антрацита / *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2004. № 4. С. 17–20.

53. *Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів* / А. Я. Карвацький, Є. М. Панов, С. В. Кутузов та ін. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 352 с.

54. *Essential Readings in Light Metals: Electrode Technology for Aluminum Production*, Vol. 4 / ed. by A. Tomsett, J. Johnson. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2013. 1210 p. doi: 10.1002/9781118647745.

55. *Панов Е. Н., Лелека С. В., Коржик М. В.* Комплекс сбора данных для высокотемпературных промышленных агрегатов // *ПиКАД.* 2005. № 2. С. 28–30.

56. *Карвацький А. Я., Лазарев Т. В., Педченко А. Ю.* Экспериментальное исследование теплового состояния промышленного пресса для формования углеродной продукции // *Вісник Хмельницького національного університету, Серія: Технічні науки.* Хмельницький. 2016. № 3 (237). С. 188–194.

57. *Händle F.* Extrusion in ceramics. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007. 470 p. doi:10.1007/978-3-540-27102-4.

58. *Реологічні властивості вуглецевих композицій в діапазоні температури 120–170 °C* / А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарев, Д. Г. Швачко, О. С. Тищенко // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* 2016. № 18 (1190). С. 74–79. doi:10.20998/2413-4295.2016.18.11.

59. *Спосіб* визначення конструктивно-технологічних параметрів процесу екструзійного пресування електродних заготовок з вуглевмісної композиції. Пат. UA107104U, МПК(2006.01) В30В 11/26 / А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, І. О. Мікульонок, Т. В. Лазарев, О. С. Тищенко ; заявник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». № u201510605 ; заявл. 30.10.15; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10. 4 с.

60. *Пристрій* для пресування електродних заготовок. Пат. UA107805U, МПК(2016.01) В30В 11/00 / І. О. Мікульонок, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев, А. Ю. Педченко; заявник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т»; № u 201512034 ; заявл. 04.12.2016. опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12. 2 с.

61. *Спосіб* визначення густини теплового потоку твердого тіла в прозорому для інфрачервоного випромінювання рухомому середовищі. Пат. UA107147U, МПК(2016.01) G01K 17/00 / А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарев, С. В. Лелека, І. О. Мікульонок, А. Ю. Педченко ; заявник Нац. техніч. ун-т України «Київ. політехн. ін-т». № u201511173 ; заявл. 13.11.15; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10. 3 с.

62. *Закономірності* процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах / Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацький, Є. М. Панов та ін. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 156 с.



63. *Карвацький А. Я.* Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2015. 392 с.
64. *Карвацький А. Я.* Механіка суцільних середовищ. Розв'язання задач : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2016. 392 с.
65. *Карвацький А. Я., Лазарєв Т. В., Тищенко О. С.* Математичне моделювання екструзії електродних заготовок // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2015. № 1(14). С. 12–16.
66. *Жученко А. І., Карвацький А. Я., Цапар В. С.* Математична модель процесу скловаріння // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2014. № 2(13). С. 97–104.
67. *Deshko V. I., Karvatskii A. Ya., Sukhodub I. O.* Heat and mass transfer in cross-flow air-to-air membrane heat exchanger in heating mode // Applied Thermal Engineering. 2016. Vol. 100, N 5, P. 133–145. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.01.139.
68. *Карвацький А. Я., Педченко А. Ю.* Розв'язання нелінійних нестационарних задач теплопровідності з використанням САД-систем // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки. 2016. № 13. С. 67–77.
69. *Карвацький А. Я., Лазарєв Т. В., Коржик М. В.* Числові дослідження кампанії формування великогабаритних вуглецевих виробів методом екструзії через мундштук // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2016. № 25(1197). С. 99–106. doi: 10.20998/2413-4295.2016.25.15.
70. *Карвацький А. Я., Педченко А. Ю.* Розв'язання нелінійної нестационарної задачі тепло-електропровідності методом скінченних елементів / Вісник ПДТУ. Серія: Технічні науки. 2016. Вип. 32. С. 205–214.
71. *Мікульонок І. О.* Полімерні композиційні матеріали. Визначення реологічних властивостей // Хімічна промисловість України. 2003. № 6. С. 58–61.
72. *Мікульонок І. О., Радченко Л. Б.* Полімерні композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості : термінол. слов. Київ : ІВЦ «Видавництво „Політехніка”», 2005. 179 с.
73. *Мікульонок І. О., Радченко Л. Б.* Переробка вторинної сировини екструзією. Київ : НТУУ «КПІ», 2006. 184 с.
74. *Лукашова В. В., Мікульонок І. О., Радченко Л. Б.* Черв'ячна екструзія. Узагальнена математична модель // Хімічна промисловість України. 2007. № 1. С. 32–35.
75. *Мікульонок І. О.* Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини. Київ : НТУУ «КПІ», 2009. 264 с.
76. *Микульёнок И. О.* Определение реологических свойств термопластичных композиционных материалов // Пластические массы. 2011. № 7. С. 26–30.
77. *Mikulionok I. O., Radchenko L. B.* Screw extrusion of thermoplastics: I. General model of the screw extrusion // Russian Journal of Applied Chemistry. 2012. Vol. 85, N 3. P. 489–504. doi: 10.1134/s1070427211030305.

78. *Mikulionok I. O., Radchenko L. B.* Screw extrusion of thermoplastics: II. Simulation of feeding zone of the single screw extruder // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012. Vol. 85, N 3. P. 505–514. doi: 10.1134/s1070427211030317.
79. *Mikulionok I. O.* Screw extruder mixing and dispersing units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 49, N 1–2. P. 103–109. doi: 10.1007/s10556-013-9711-y.
80. *Мікульонок І. О.* Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології: підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 340 с.
81. *Мікульонок І. О.* Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 312 с.
82. *Mikulionok I. O.* Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51, N 1–2. P. 14–19. doi: 10.1007/s10556-015-9990-6.
83. *Мікульонок І. О.* Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. 324 с.
84. *Mikulionok I., Gavva O., Kryvoplias-Volodina L.* Modeling of melting process in a single screw extruder for polymer processing // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 2, N 2/5 (92). P. 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127583.
85. *Mikulionok I., Gavva O., Kryvoplias-Volodina L.* Modeling the process of polymer processing in twin-screw extruders // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. N 4/5 (94). P. 35–44. doi: 10.15587/1729-4061.2018.139886.
86. *Мікульонок І. О.* Механічні та гідромеханічні процеси, апарати і машини хімічної технології : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 172 с.
87. *Mikulionok I. O.* Classification of gravity mixers of bulk materials (survey of patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020. Vol. 56, N 1–2. P. 157–164. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00753-4>
88. *Conversion of water vapor and gasification of core charge in graphitization Acheson furnaces / Ye. Panov, A. Karvatskii, S. Leleka et al.* // *Scientific letters of academic society of Michal Baludansky*. 2016. N 4. P. 15–18.
89. *Педченко А. Ю., Коржик М. В.* В'язкість вуглецевої маси в діапазоні температури 120–170 °С // Міжн. науково-технічна конф. «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта». Одеса, 21–24 червня 2016 р. : матер. конф. Одеса–Київ: С. 71–73. [http://conf.mmi.kpi.ua/public/conferences/29/MNTK-17\\_2016-2.pdf](http://conf.mmi.kpi.ua/public/conferences/29/MNTK-17_2016-2.pdf).
90. *Експериментальне дослідження процесу формування вуглецевих виробів методом пресування на промисловому обладнанні / Т. В. Лазарєв, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко* // *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. 2016, Вип. 25. С. 101–115.

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
Перелік умовних позначень, символів і скорочень .....	5
1. Сучасний стан проблеми розвитку процесу та обладнання для екструзійного пресування електродних заготовок .....	8
1.1. Різновидність способів пресування.....	8
1.2. Основні технологічні процеси, що проходять під час екструзії електродної маси.....	11
1.3. Способи вдосконалення процесу пресування вуглеграфітових заготовок .....	13
1.4. Застосування математичного моделювання фізичних полів під час екструзії вуглепеккових композитів крізь мундштук .....	15
1.5. Числові методи розв'язання задач, що описують поведінку коксопеккової суміші в процесі пресування заготовок .....	16
1.6. Програмне забезпечення для розв'язання задач екструзії електродних заготовок крізь мундштук .....	19
1.7. Висновки до розділу 1 .....	20
2. Математичне моделювання теплогідродинамічного стану технологічного обладнання для екструзії вуглеграфітових електродних заготовок.....	23
2.1. Фізична та математична моделі теплогідродинамічного стану пресового устаткування .....	23
2.2. Методика числового розв'язання задачі на базі методу скінченних об'ємів .....	29
2.3. Висновки до розділу 2 .....	38
3. Експериментальні дослідження фізичних властивостей вуглепеккових композитів і фізичних полів пресового інструменту .....	39
3.1. Експериментальна установка, методика та результати дослідження динамічної в'язкості коксопеккових композитів .....	39
3.2. Експериментальна установка, методика та результати дослідження зсувного напруження вуглепеккової маси .....	44
3.3. Методика та результати енерготермоаудиту пресового інструменту ....	46
3.4. Висновки до розділу 3 .....	57
4. Числові дослідження процесу екструзії вуглепеккових електродних заготовок .....	58
4.1. Початкові та граничні умови для числової моделі пресування електродних заготовок .....	58
4.2. Верифікація числової моделі .....	59
4.3. Результати числового моделювання .....	61
4.4. Вплив зміни технологічних параметрів на показники режиму пресування .....	68
4.5. Аналіз отриманих результатів .....	72
4.6. Висновки до розділу 4 .....	72

5. Рекомендації щодо впровадження енергоефективних процесів та обладнання для одержання бездефектних електродних заготовок.....	74
5.1. Спосіб визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів процесу екструзійного пресування електродних заготовок з вуглевмісної композиції.....	74
5.2. Модернізація пристрою для пресування електродних заготовок .....	75
5.3. Висновки до розділу 5 .....	76
6. Результати впровадження запропонованих технічних рішень з ресурсоенергозбереження в технології пресування електродного виробництва .....	77
6.1. Загальні відомості .....	77
6.2. Висновки до розділу 6 .....	77
Висновки і рекомендації.....	78
Перелік посилань.....	81

Наукове видання

**Панов Євген Миколайович**  
**Лелека Сергій Володимирович**  
**Карвацький Антон Янович**  
**Мікульонок Ігор Олегович**

# **ЕНЕРГОРЕСУРСОЕФЕКТИВНЕ ПРЕСУВАННЯ ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ**

**Монографія**

*В авторській редакції*

Підписано до друку 12.10.2020 р. Формат 60х84 1/16  
Папір офс. 80 г/м<sup>2</sup>. Друк цифровий. Умов. друк. арк. 4,94  
Наклад 300 прим. Зам. № 0810

Видавництво: Інститут обдарованої дитини НАПН України  
04053, вул. Січових Стрільців, 52-Д, м. Київ, Україна  
тел./факс: (044) 481-27-16

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру  
суб'єкта видавничої справи  
серія ДК No 6081 від 14.03.2018 р.